



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 141584

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN MEDIA PENDINGIN PROSES *HARDENING* PADA SIFAT KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS MATERIAL ASTM A 532 CLASS III TYPE A SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN PADA *CHUTE* *INLET FEED LINER VERTICAL ROLLER MILL*

MUHAMMAD FARISI
NRP. 2713 100 083

Dosen Pembimbing

Budi Agung Kurniawan ST., M.Sc

Wikan Jatimurti ST., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



TUGAS AKHIR - TL141584

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN MEDIA PENDINGIN PROSES *HARDENING* PADA SIFAT KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS MATERIAL ASTM A 532 CLASS III TYPE A SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN PADA *CHUTE INLET FEED LINER VERTICAL ROLLER MILL*

MUHAMMAD FARISI
NRP. 2713 100 083

Dosen Pembimbing :
Budi Agung Kurniawan ST., M.Sc
Wikan Jatimurti ST., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

THE EFFECT OF TEMPERATURE AND COOLING MEDIA ON HARDENING PROCESS ON HARDNESS AND WEAR RESISTANCE OF ASTM A532 CLASS III TYPE A AS A SOLUTION FOR CHUTE INLET FEED LINER FAILURE IN VERTICAL ROLLER MILL

MUHAMMAD FARISI
2713 100 083

Supervisor:
Budi Agung Kurniawan ST., M.Sc
Wikan Jatimurti ST., M.Sc

MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017

(This Page is Left Intentionally Blank)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Metalurgi dan Manufaktur
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

MUHAMMAD FARISI

NRP 2713 100 083

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. (Pembimbing I)

Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN MEDIA PENDINGIN PROSES *HARDENING* PADA SIFAT KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS MATERIAL ASTM A 532 CLASS III TYPE A SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN PADA *LINING CHUTE INLET FEED VERTICAL ROLLER MILL*

Nama Mahasiswa : Muhammad Farisi
NRP : 2713 100 083
Departemen : Teknik Material
Dosen Pembimbing : Budi Agung Kurniawan, ST., M. Sc
: Wikan Jatimurti ST., M. Sc

ABSTRAK

Chute Inlet Feed merupakan saluran masuk *feed material* dari *belt conveyor* menuju *rotary feeder* pada *vertical roller mill*. *Raw material* jatuh dari *belt conveyor* setinggi 5 meter dengan debit 700.000 tph. Kemudian material tersebut meluncur menuju *rotary feeder* untuk selanjutnya diproses dalam *vertical roller mill*. Dengan spesifikasi kerja yang demikian, maka dibutuhkan komponen yang memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang baik agar proses dapat berlangsung dengan baik. Oleh karena itu dibutuhkan *liner* pada *chute inlet feed* yang terbuat dari material yang sesuai dengan kondisi kerja. Pada kenyataannya, material *liner* yang diharapkan mampu beroperasi sekitar 1 tahun sudah mengalami keausan yang cukup signifikan hanya dalam 3 dan 8 bulan selama 2 kali pelaksanaan perawatan. Dalam penelitian ini dilakukan analisa kegagalan penyebab terjadinya kegagalan pada *chute inlet feed liner* dan menganalisis pengaruh proses *hardening* dengan variasi temperatur *hardening* dan media pendingin sebagai solusi kegagalan pada *chute inlet feed liner*. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian adalah uji komposisi, metalografi, XRD, *hardness* dan ketahanan aus. Pada pengujian komposisi, diketahui bahwa material *liner* yang digunakan adalah ASTM A532 Class III Type A. untuk memperbaiki material ini dilakukan

proses *hardening* pada temperatur 950°C, 900°C, 850°C, 800°C, yang kemudian di *quench* dengan media pendingin udara dan oli untuk meningkatkan kekerasannya dan ketahanan aus. Lalu, dilakukan *tempering* pada temperatur 250°C selama 120 menit untuk mengembalikan sedikit ketangguhannya. Setelah diberi perlakuan panas, didapatkan nilai kekerasan yang paling tinggi sebesar 866 HV dan laju keausan yang paling rendah sebesar 4,84 mm/hari adalah spesimen dengan temperatur *hardening* 950°C dengan penggunaan media pendingin udara. Nilai kekerasan yang meningkat sebanding dengan ketahanan aus yang meningkat dari material *liner*.

Kata Kunci : lining chute inlet feed, ASTM A 532, hardening, media pendingin, hardness, ketahanan aus

THE EFFECT OF TEMPERATURE AND COOLING MEDIA ON HARDENING PROCESS ON HARDNESS AND WEAR RESISTANCE OF ASTM A 532 CLASS III TYPE A MATERIAL AS A SOLUTION FOR CHUTE INLET FEED LINER FAILURE IN VERTICAL ROLLER MILL

Name : Muhammad Farisi
ID : 2713 100 083
Departement : Material Engineering
Advisor : Budi Agung Kurniawan, ST., M. Sc
: Wikan Jatimurti ST., M. Sc

ABSTRACT

Chute inlet feed is a feed material channel from belt conveyor to rotary feeder in a vertical roller mill. The raw materials fall down from a 5-meter belt conveyor with capacity 700.000 tph. Later, the material slid into the rotary feeder for further processing in vertical roller mill. With such working specification, a component with decent hardness and wear resistance is needed in order to the process proceed properly. Therefore, the liner on the chute inlet feed should be made of materials that suitable for its working condition. In fact, the liner material that was expected to operate for a year had suffered wear significantly in 3-8 months in every maintenance. The purpose of this research is to analyze the cause of failure on chute inlet feed liner and hardening process with temperature and cooling media variation. Tests conducted in this research is composition, metallography, XRD, hardness, and wear resistance tests.

On composition tests, the material liner that was used is ASTM A532 class III type A has been known. The temperature that required to repair the material is 950°C, 900°C, 850°C, and 800°C with holding time for 60 minutes. The quenching process was occurred with several cooling media; air, oil, and water to increase its hardness and wear resistance. Tempering process occurred afterwards with temperature 250°C for 120 minutes to

restore its toughness. The conclusion of this research is the highest hardness and lowest wear resistance occurred after the heat treatment at 950°C hardening temperature with air as cooling media. The value of the hardness is 866 HV with wear velocity 4,84 mm/day. The hardness value increase along with the value of material liner wear resistance.

Keyword : ASTM A 532, chute inlet feed liner, hardening, hardness, wear resistance

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT atas segenap rahmat dan hidayah yang senantiasa diberikan, sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Media Pendingin Proses *Hardening* terhadap Sifat Kekerasan dan Ketahanan Aus Material ASTM A532 Class III Type A Sebagai Solusi Kegagalan Pada *Chute Inlet Feed Liner* pada Vertical Roller Mill”**. Banyak pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini, oleh Karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih, kepada:

1. Kedua Orang Tua, dan keluarga yang telah memberikan banyak doa, moril maupun materiil.
2. Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. dan Wikan Jatimurti S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat.
3. Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
4. Dr. Eng. Hosta Ardhyana ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. Dian Mughni Felicia S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
6. Deno Mandrial, S.T. selaku pembimbing di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
7. Dan seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi dalam Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih ada kekurangan dalam laporan tugas akhir ini. Semoga yang telah penulis susun dapat menjadi manfaat untuk kita semua

Surabaya, 10 Juli 2017

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. <i>Vertical Roller Mill</i>	5
2.2. <i>Chute Inlet Feed Liner</i>	6
2.3. <i>Material Chute Inlet Feed Liner</i>	8
2.3.1. Material Standar (<i>Ni-Hard</i>)	8
2.3.2. Material yang Mengalami Kegagalan (ASTM A532) .	9
2.4. Baja	10
2.4.1. Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	11
2.4.2. Pengaruh Unsur Paduan terhadap Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	12
2.5. Besi Tuang (<i>Cast Iron</i>).....	13
2.5.1. Besi Tuang Putih (<i>White Cast Iron</i>)	14
2.5.2 <i>High Chromium White Cast Iron</i>	15
2.6. Analisis Kegagalan.....	20
2.6.1. Wear (Keausan).....	20
2.7. Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>)	23
2.7.1. Pengerasan (<i>Hardening</i>).....	23
2.7.2. Austenitisasi	24

2.7.3. Pendinginan (<i>Quenching</i>).....	25
2.7.4. <i>Tempering</i>	26
2.8. Pengujian.....	27
2.8.1. Pengujian Kekerasan	27
2.8.2. Pengujian ketahanan Aus	27
2.8.3. Pengujian XRD	29
2.9. Penelitian Sebelumnya	30
2.9.1. <i>Improvement of Abrasive Wear Resistance of the High Chromium Cast Iron ASTM A-532 through Thermal Treatment Cycles</i>	30
2.9.2. Karakteristik Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Putih Paduan Krom Tinggi Hasil <i>Thermal Hardening</i> untuk Aplikasi <i>Grinding Ball</i>	33

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian	37
3.2. Metode Penelitian.....	38
3.3. Material yang digunakan	38
3.4. Peralatan.....	39
3.5. Tahapan Penelitian	44
3.5.1. Review Dokumen Perusahaan	44
3.5.2. Preparasi Spesimen	44
3.5.3. Pengujian Komposisi	45
3.5.4. Proses Perlakuan Panas	45
3.5.5. Pengamatan Mikroskopik.....	46
3.5.6. Pengujian Kekerasan	46
3.5.7. Pengujian Ketahanan Aus	47
3.5.8. Pengujian XRD	49
3.6. Rancangan Penelitian	50

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data Kegagalan Material.....	51
4.1.1. <i>Record Chute Inlet Feed Liner pada Vertical Roller Mill</i>	51
4.1.2 Pengamatan Makroskopis Pada <i>Chute Inlet Feed Liner</i> yang Mengalami Kegagalan.....	52
4.1.3. Hasil Uji Komposisi Material <i>Liner</i>	53

4.1.4. Hasil Pengujian XRD pada Material <i>Liner</i> yang Mengalami Kegagalan.....	54
4.1.5. Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Material <i>Liner</i> yang Mengalami Kegagalan	55
4.1.6. Hasil Pengujian Kekerasan pada Material <i>Liner</i> yang Mengalami Kegagalan.....	56
4.2. Hasil Proses Perlakuan Panas Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Hardening</i>	57
4.2.1. Hasil Pengujian XRD Pada Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Hardening</i>	58
4.2.2. Hasil Pengujian Struktur Mikro Pada Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Hardening</i>	63
4.2.3. Hasil Pengujian Kekerasan Pada Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Hardening</i>	68
4.3. Hasil Proses Perlakuan Panas Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Tempering</i>	69
4.3.1. Hasil Pengujian XRD Pada Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Hardening</i>	70
4.3.2. Hasil Pengujian Struktur Mikro Pada Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Hardening</i>	75
4.3.3. Hasil Pengujian Kekerasan Pada Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Hardening</i>	80
4.3.4. Hasil Pengujian Ketahanan Aus Pada Material <i>Liner</i> Setelah Proses <i>Hardening</i>	81
4.4. Pembahasan.....	83
BAB V KESIMPULAN	
5.1 Kesimpulan	89
5.2 Saran	89
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN	xxvii
BIODATA PENULIS	lvii

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Vertical roller mill</i> (FLSmith, 2016)	5
Gambar 2.2 Lokasi <i>liner chute inlet feed</i> pada <i>vertical roller mill</i> (FLSmith, 2016)	7
Gambar 2.3 <i>Liner chute inlet feed</i> pada <i>vertical roller mill</i>	8
Gambar 2.4 Diagram fasa Fe- Fe ₃ C (Avner, 1974)	12
Gambar 2.5 Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutektoid (kiri) dan kadar dalam eutektoid (kanan) (Avner, 1974)	13
Gambar 2.6 Struktur mikro besi tuang putih sebelum perlakuan panas (Ortega-Cubillos, 2015)	14
Gambar 2.7 Diagram fasa ekuilibrium <i>high chromium white cast</i> <i>iron</i> dengan kadar kromium 25% (Li, et al, 2009)	16
Gambar 2.8 Struktur mikro (a) Primary carbide M ₇ C ₃ (b) <i>Eutectic</i> <i>carbides</i> M ₇ C ₃	17
Gambar 2.9 Struktur mikro (a) Primary carbide M ₇ C ₃ (b) <i>Eutectic</i> <i>carbides</i> M ₇ C ₃	18
Gambar 2.10 Mekanisme <i>adhesive wear</i> (Askeland, 2010)	21
Gambar 2.11 Mekanisme <i>abrasive wear</i> (Askeland, 2010)	22
Gambar 2.12 Skema perlakuan panas untuk pengerasan <i>high</i> <i>chromium white cast irons</i> (ASM Handbook Vol. 4, 1991)	24
Gambar 2.13 Pengaruh temperatur austenitisasi pada kekerasan (H) dan austenit sisa (x) pada <i>high chromium white</i> <i>cast iron</i> (ASM Handbook Vol. 4, 1991)	25
Gambar 2.14 Diagram CCT untuk <i>class III</i> (28% Cr) <i>white cast</i> <i>iron</i> yang mengandung 2,6% C, 0,8% Si, 0,6% Mn, dan 27,8% Cr (ASM Handbook Vol. 4, 1991)	26
Gambar 2.15 Skema pengujian ketahanan aus dengan metode <i>pin</i> <i>on disk</i> (ASTM G99, 2003)	28
Gambar 2.16 Skema perlakuan panas dengan menggunakan media pendingin yang berbeda (Higuera-Cobos, 2015).	31

Gambar 2.17 Korelasi antara kekerasan dan a) <i>volumetric loss</i> dan b) <i>wear coefficient</i> (Higuera-Cobos, 2015).....	32
Gambar 2.18 Struktur mikro material ASTM A532 <i>type II-A</i> dengan mikroskop optik pada kondisi <i>as-cast</i> (Astuti, 2015)	35
Gambar 2.19 Struktur mikro material ASTM A532 <i>type II-A</i> dengan media pendingin oli pada kondisi (a) <i>as-quenched</i> (b) <i>tempering 250 °C</i> (c) <i>tempering 300 °C</i> (d) <i>tempering 350 °C</i> (Astuti, 2015).....	35
Gambar 2.20 Struktur mikro material ASTM A532 <i>type II-A</i> dengan media pendingin udara paksa pada kondisi (a) <i>as-quenched</i> (b) <i>tempering 250 °C</i> (c) <i>tempering 300 °C</i> (d) <i>tempering 350 °C</i> (Astuti, 2015)	36
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	37
Gambar 3.2 (a) <i>New liner</i> (b) <i>Failure liner</i>	39
Gambar 3.3 Mesin wire cut	39
Gambar 3.4 Kamera Digital	40
Gambar 3.5 Mesin OES (<i>Optical Emission Spectrocopy</i>)	40
Gambar 3.6 <i>Furnace</i>	41
Gambar 3.7 Mesin uji kekerasan	41
Gambar 3.6 <i>Furnace</i>	41
Gambar 3.8 <i>Abrasive paper</i>	42
Gambar 3.9 Mesin <i>polish</i>	42
Gambar 3.10 Mikroskop Optik.....	43
Gambar 3.11 Alat uji ketahanan aus	43
Gambar 3.12 Mesin pengujian XRD	44
Gambar 3.13 Proses <i>hardening</i> dengan variasi temperatur dan media pendingin	45
Gambar 3.14 Pembagian daerah indentasi uji kekerasan <i>Vickers</i>	47
Gambar 3.15 Daerah Indentasi Uji Kekerasan.....	47
Gambar 3.16 Skema uji ketahanan aus material (a) spesimen (b) beban (c) <i>holder</i> (d) material abrasif dapat berupa kertas amplas atau batu gerinda (e) piringan pemutar (f) penyangga (Yuswono, 2004)	48

Gambar 4.1	<i>Chute inlet feed liner assembly</i>	51
Gambar 4.2	Material <i>liner</i> (a) <i>New liner</i> (b) <i>Failure liner</i>	52
Gambar 4.3	(a) Penampang permukaan material <i>liner</i> yang mengalami kegagalan (b) Pengurangan ketebalan pada material <i>liner</i>	53
Gambar 4.4	Grafik XRD material <i>liner</i> yang mengalami kegagalan.....	55
Gambar 4.5	Struktur mikro material <i>liner</i> (a) <i>New liner</i> (b) <i>Failure liner</i> . Perbesaran 200X.	56
Gambar 4.6	Grafik nilai kekerasan material <i>new liner</i> dan <i>failure liner</i>	57
Gambar 4.7	Grafik XRD material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada temperature 800°C	58
Gambar 4.8	Grafik XRD material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada temperature 850°C	59
Gambar 4.9	Grafik XRD material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada temperature 900°C	60
Gambar 4.10	Grafik XRD material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada temperature 950°C	61
Gambar 4.11	Struktur mikro material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada 800°C dengan <i>quenching</i> dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara. Perbesaran 500x.....	64
Gambar 4.12	Struktur mikro material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada 850°C dengan <i>quenching</i> dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara. Perbesaran 500x.....	65
Gambar 4.13	Struktur mikro material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada 900°C dengan <i>quenching</i> dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara. Perbesaran 500x.....	66
Gambar 4.14	Struktur mikro material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada 950°C dengan <i>quenching</i> dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara. Perbesaran 500x.....	67

Gambar 4.15	Grafik sifat kekerasan hasil proses hardening material <i>liner</i>	69
Gambar 4.16	Grafik XRD material <i>liner</i> setelah proses <i>tempering</i> pada temperature 800°C	70
Gambar 4.17	Grafik XRD material <i>liner</i> setelah proses <i>tempering</i> pada temperature 850°C	71
Gambar 4.18	Grafik XRD material <i>liner</i> setelah proses <i>tempering</i> pada temperature 900°C	72
Gambar 4.19	Grafik XRD material <i>liner</i> setelah proses <i>tempering</i> pada temperature 950°C	73
Gambar 4.20	Struktur mikro material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada 800°C dengan <i>quenching</i> dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara dan dilakukan proses <i>tempering</i> . Perbesaran 200x	76
Gambar 4.21	Struktur mikro material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada 850°C dengan <i>quenching</i> dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara dan dilakukan proses <i>tempering</i> . Perbesaran 200x	77
Gambar 4.22	Struktur mikro material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada 900°C dengan <i>quenching</i> dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara dan dilakukan proses <i>tempering</i> . Perbesaran 200x	78
Gambar 4.23	Struktur mikro material <i>liner</i> setelah proses <i>hardening</i> pada 950°C dengan <i>quenching</i> dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara dan dilakukan proses <i>tempering</i> . Perbesaran 200x	79
Gambar 4.24	Grafik sifat kekerasan hasil proses hardening dan tempering material <i>liner</i>	81
Gambar 4.25	Grafik laju keausan material <i>liner</i>	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Material <i>Ni-Hard</i> (Rohrig, 1996)...	9
Tabel 2.2 Sifat Mekanik <i>Ni-Hard</i> (Rohrig, 1996)	9
Tabel 2.3 Komposisi Kimia ASTM A532 (ASTM A532, 2003)	10
Tabel 2.4 Komposisi Kimia ASTM A532 (ASTM A532, 2003)	10
Tabel 2.5 Perbandingan Kekerasan Fasa yang Terbentuk pada <i>High Chromium White Cast Iron</i> (Kopycinski, 2014; Wiengmoon, 2011)	20
Tabel 2.6 Nilai Kekerasan dari Beberapa Material Abrasif (Wiengmoon, 2011)	22
Tabel 2.7 Nilai kekerasan ASTM A532 <i>type II-A</i> pada berbagai media <i>quenching</i> dan variasi temperatur <i>tempering</i> (Astuti, 2015)	34
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian	50
Tabel 4.1 Data Operasi <i>Chute Inlet Feed Liner</i>	52
Tabel 4.2 Hasil komparasi Uji Komposisi	54
Tabel 4.3 Daftar <i>Peak</i> Hasil Uji XRD <i>Failure Liner</i>	55
Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Kekerasan	57
Tabel 4.5 Perbandingan Daftar <i>Peak</i> pada Material <i>Liner</i> setelah Proses Perlakuan <i>Hardening</i>	62
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kekerasan pada material <i>liner</i> yang telah di <i>hardening</i>	68
Tabel 4.7 Perbandingan Daftar Peak pada Material Liner setelah Proses Perlakuan <i>Tempering</i>	74
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Kekerasan pada material <i>liner</i> yang telah di <i>tempering</i>	80
Tabel 4.9 Perbandingan laju keausan dan kekerasan pada material <i>liner</i> yang telah di <i>hardening</i> dan <i>tempering</i>	82

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk (dahulu PT. Semen Gresik (Persero) Tbk) merupakan perusahaan penghasil semen yang terbesar di Indonesia. Produksi PT. Semen Indonesia meningkat menjadi 31,8 juta ton semen per tahun, dan menguasai sekitar 42% pangsa pasar semen domestik. PT. Semen Indonesia memiliki 4 anak perusahaan yaitu PT. Semen Gresik, PT. Semen Padang, PT. Semen Tonasa dan *Thang Long Cement*. Untuk PT. Semen Indonesia sendiri memiliki 4 pabrik dengan kapasitas terpasang 8,5 juta ton semen per tahun yang berlokasi di Desa Sumberarum, Kec. Kerek, Tuban, Jawa Timur

Proses pembuatan semen PT. Semen Indonesia unit Tuban IV secara garis besar melalui proses dengan dimulai dari pengambilan bahan baku, proses pembuatan terak (*clinker*), proses penggilingan semen (*milling*), penyimpanan dalam *silo*, dan pengemasan semen (*packing*). Proses pembuatan terak (*clinker*) meliputi pemanasan awal, pengeringan dalam *rotary kiln*, dan pendinginan (*Cooling*). Proses penggilingan meliputi pencampuran dengan aditif, penggerusan dan pembentukan *powder*. Proses *packing* yaitu memasukan semen kedalam kemasan dan menyimpan kedalam gudang. (Ibrahim,2004)

Pengolahan bahan awal pada industri semen biasa disebut dengan *raw mill*. *Raw mill* berfungsi untuk menghaluskan dan mengeringkan material hingga kadar airnya kurang dari 1% menggunakan *vertical roller mill*. Material tersebut masuk ke dalam *vertical roller mill* dengan komposisi 89,7% campuran antara batu kapur dengan tanah liat, 9% kapur yang ditambahkan ketika sistem yang dihasilkan kekurangan batu kapur, 1% pasir besi, dan 0.3% pasir silika. Material-material tersebut masuk ke dalam *roller mill* melalui alat transportasi berupa *belt conveyor* menuju ke *rotary feeder*. *Rotary feeder* berfungsi untuk



menstabilkan masuknya material ke dalam *vertical roller mill*. (Hanidya, 2016)

Chute Inlet Feed merupakan saluran masuk *feed material* dari *belt conveyor* menuju *rotary feeder* pada *vertical roller mill*. *Raw material* jatuh dari *belt conveyor* setinggi 5 meter dengan debit 700.000 tph. Kemudian material tersebut meluncur menuju *rotary feeder* untuk selanjutnya diproses dalam *vertical roller mill*. Dengan spesifikasi kerja yang demikian, maka dibutuhkan komponen yang memiliki kekerasan, ketahanan aus, serta kemampuan menerima beban *impact* secara terus-menerus yang tinggi agar proses dapat berlangsung dengan baik. Oleh karena itu dipasanglah *lining* pada *Chute Inlet Feed Liner* yang terbuat dari material yang sesuai dengan kondisi kerja. Pada kenyataannya, material *lining* yang diharapkan mampu beroperasi sekitar 1 tahun sudah mengalami keausan yang cukup signifikan hanya dalam 3 dan 8 bulan selama 2 kali pelaksanaan perawatan. Oleh karena itu perlu untuk melakukan penelitian guna menganalisis kegagalan yang terjadi dan meminimalisir terjadinya keausan pada material *lining* yang ada di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk dengan melakukan proses *hardening* dan *tempering* dengan temperatur dan media pendingin yang berbeda pada proses *hardening* untuk mendapatkan hasil yang optimal..

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Apa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill*?
2. Bagaimana pengaruh proses *hardening* dengan variasi temperatur dan media pendingin terhadap sifat kekerasan dan ketahanan aus sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill*?



1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Data operasi *Vertical Roll Mill* seperti temperatur, kecepatan feed material sudah memenuhi standar operasional.
2. Desain *Vertical Roll Mill* memenuhi standart operasional.
3. Material dianggap homogen di semua sisi.
4. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat material uji keluar dari *furnace*.
5. Diasumsikan pemanasan di dalam *furnace* homogen di semua bagian.
6. Lama waktu pemindahan spesimen uji dari *furnace* ke media pendingin diasumsikan konstan pada semua spesimen uji.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill*.
2. Menganalisis pengaruh proses *hardening* dengan variasi temperatur dan media pendingin terhadap sifat kekerasan dan ketahanan aus sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill*.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat kepada seluruh pihak yang berkaitan, yaitu mahasiswa sebagai pelaksana penelitian mampu memahami serta mengaplikasikan ilmu yang telah didapat khususnya cabang ilmu material dan metalurgi, PT. Semen Indonesia Tbk sebagai pihak utama yang menyokong penelitian dapat menerapkan hasil penelitian untuk:



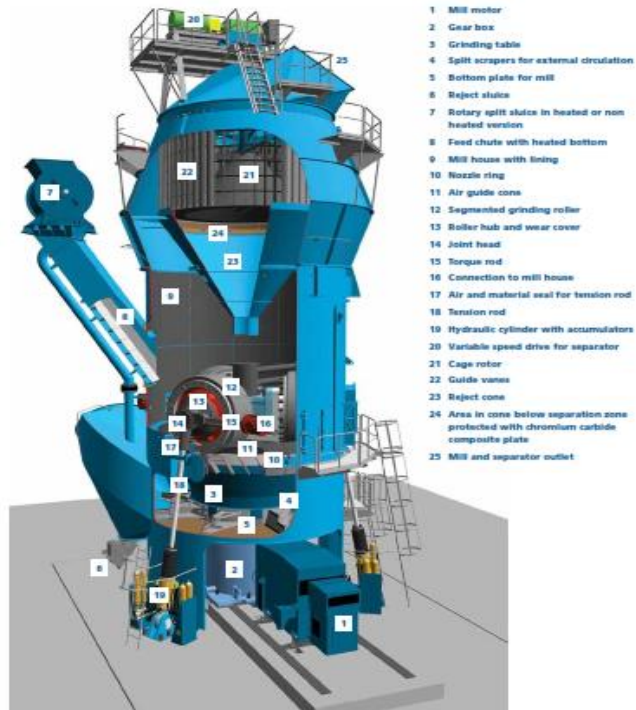
1. Referensi untuk penanganan bila terjadi kegagalan pada *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill*.
2. Referensi pemilihan bahan serta *maintenance* pada *Lining Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill*.
3. Referensi perlakuan panas pada material *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill*.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Vertical Roll Mill

Pada industri semen, raw material di dalam *stockpile* untuk selanjutnya diangkut ke dalam bin, bin ini adalah tempat pencampuran *feed* dari raw mill. Dalam proses raw mill, terdapat 4 jenis bin, bin pertama berisi batu kapur koreksi yang mana akan ditambahkan pada proses produksi ketika dinilai kualitas semen kurang, bin kedua berisi campuran antara batu kapur dan tanah liat, bin ketiga berisi pasir besi, sedangkan bin keempat berisi pasir silika.



Gambar 2.1 Vertical Roller Mill (FLSmith, 2016)



Material-material tersebut selanjutnya dilakukan pengolahan bahan awal atau biasa disebut raw mill, raw mill berfungsi untuk menghaluskan dan juga mengeringkan material hingga kadar air kurang dari 1% menggunakan *vertical roller mill*. Material tersebut masuk ke dalam *vertical roller mill* dengan komposisi 89,7% campuran antara batu kapur dengan tanah liat, 9% kapur yang ditambahkan ketika system yang dihasilkan kekurangan batu kapur, 1% pasir besi, dan 0.3% pasir silika. (Hanidya, 2016)

Gambar 2.1 menunjukkan komponen utama *vertical roller mill*. Proses penggilingan dimulai ketika material-material tersebut masuk ke dalam *roller mill* melalui alat transportasi berupa *belt conveyor* menuju ke (7) *rotary feeder*. *Rotary feeder* berfungsi untuk menstabilkan masuknya material ke dalam *vertical roller mill* (Hanidya, 2016). *Vertical roller mill* menggunakan tekanan sebesar 23-25 bar yang dihasilkan diantara (12) *roller* dan (3) *rotating table* untuk menghancurkan dan menggiling raw material. Feed material masuk ke dalam *grinding table* melalui (8) *feedchute*. Rotasi dari *grinding table* membuat material bergerak ke bawah *roller*. Material yang kasar melewati dam ring mengelilingi *grinding table* dan masuk ke dalam *hot gas stream* yang dihasilkan *nozzle ring*. Sisa air dari material menguap dalam waktu yang singkat dan material yang lebih halus terbawa ke (22) *separator* dengan gaya angkat dari *hot gas*, material yang keluar dari *vertical roller mill* diharapkan tidak lebih besar daripada 10 μm . (FLSmidth, 2016)

Vertical roller mill pada pabrik PT Semen Indonesia plant Tuban 4 menggunakan produk dari FLSmidth jenis Atox Mill 57,5 dengan kapasitas yang digunakan sebesar 700-800 ton per jam. Temperatur kerja pada *vertical roller mill* adalah sebesar $\pm 300^\circ\text{C}$. (Hanidya, 2016)

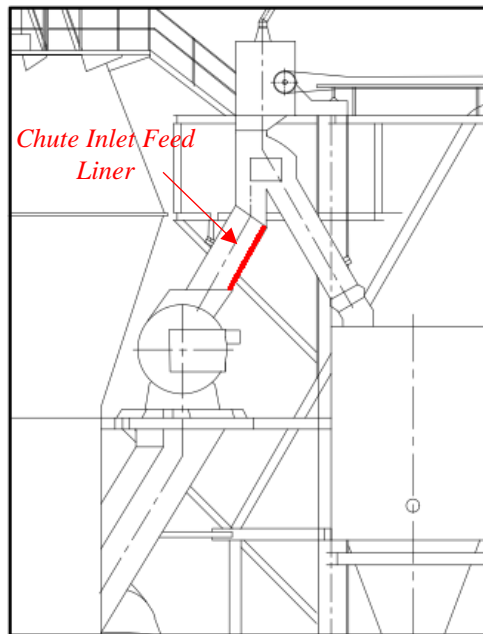
2.2 Chute Inlet Feed Liner

Chute inlet feed merupakan saluran masuk *feed material* dari *belt conveyor* menuju *rotary feeder* pada *vertical roller mill*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Raw material jatuh dari *belt conveyor* setinggi 5 meter dengan debit 700 tph. Kemudian material tersebut meluncur menuju *rotary feeder* untuk selanjutnya diproses dalam *vertical roller mill*. Dengan spesifikasi kerja yang demikian, maka dibutuhkan komponen yang memiliki kekerasan, ketahanan aus, serta kemampuan menerima beban *impact* secara terus-menerus yang tinggi agar proses dapat berlangsung dengan baik. Oleh karena itu dipasanglah *liner* pada *chute inlet feed* yang terbuat dari material yang sesuai dengan kondisi kerja.



Gambar 2.2 Lokasi *liner chute inlet feed* pada *vertical roller mill* (FLSmith, 2016)



Gambar 2.3 *Liner chute inlet feed pada vertical roller mill*

Gambar 2.2 menunjukkan lokasi dipasangnya *Chute Inlet Feed Liner* pada *vertical roller mill*, terlihat bahwa liner pada gambar tersebut di tandai dengan warna abu-abu. Sementara itu, pada gambar 2.3 terlihat kondisi di dalam *feed chute* saat terjadi proses pemeliharaan dengan *liner* yang telah terpasang.

2.3 Material Liner Chute Inlet Feed

2.3.1 Material standar (Ni-Hard)

Material *Liner Chute Inlet Feed* yang seharusnya dipakai pada *Vertical Roller Mill* PT. Semen Indonesia *plant* Tuban 4 adalah *Ni-Hard*. *Ni-Hard* adalah nama lain dari *white cast iron* dengan paduan krom dan nikel yang memberikan efek pada kekerasan yang tinggi serta ketahanan aus yang baik. *Ni-Hard* memiliki struktur mikro yang terdiri dari karbida dan martensitic-austenitik-bainitik atau didominasi oleh matriks dari martensit. Struktur ini dapat dicapai dengan komposisi yang seimbang dari karbon, nikel, krom, silikon dan perlakuan panas (Rohrig, 1996).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Berikut ini adalah spesifikasi dari *Ni-Hard* ditampilkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi *Ni-Hard* (Rohrig, 2016)

Grade	Chemical composition							
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
Ni-hard 1	3,0-	0,3-	0,3-	max	max	3,3-	1,5-	0-
	3,6	0,5	0,7	0,15	0.30	4,8	2,6	0,4
Ni-hard 2	max	0,3-	0,3-	max	max	3,5-	1,4-	0-
	2,9	0,5	0,7	0,15	0.30	5,0	2,4	0,4
Ni-Hard 4	2,6-	1,8-	0,4-	max	max	4,5-	8,0-	0-
	3,2	2,0	0,4	0,1	0.01	6,5	9,0	0,4

**in special cases*

Sifat mekanik dari beberapa tipe *Ni-Hard* yang meliputi nilai dari kekerasan, *tensile strength*, modulus elastisitas dan energi impak terdapat dalam tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat Mekanik *Ni-Hard* (Rohrig, 1996)

Type	Hardness			Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Impact Energy (J)
	Brinell	Vickers	Rockwell C			
Ni-Hard 1						
<i>Sand Cast</i>	550-690	640-750	56-63	500-620	169-183	28-41
<i>Chill Cast</i>	600-730	700-860	58-65	560-850	169-183	35-55
Ni-Hard 2						
<i>Sand Cast</i>	530-630	630-740	54-60	560-680	169-183	35-48
<i>Chill Cast</i>	580-680	680-800	57-62	680-870	169-183	48-76
Ni-Hard 4	550-700	650-820	56-63	600-800	190-200	

2.3.2 Material yang mengalami kegagalan (ASTM A 532)

Material *Liner Chute Inlet Feed* yang mengalami kegagalan adalah material ASTM A532. Spesifikasi material ini merupakan kelompok *white cast irons* yang ditambahkan paduan untuk menjaga ketahanan aus material dalam aplikasi penggunaannya di bidang pertambangan, *milling*, *earth-handling*, dan industri manufaktur (ASTM A532, 2003). Komposisi kimia



dari kelas dan tipe yang diproduksi untuk ASTM A 532 adalah sebagai berikut.

Tabel 2.3 Komposisi kimia ASTM A532 (ASTM A532, 2003)

Class	Type	Designation	Carbon	Manganese	Silicon	Nickel	Chromium	Molybdenum	Copper	Phosphorus	Sulfur
I	A	Ni-Cr-Hc	2.8–3.6	2.0 max	0.8 max	3.3–5.0	1.4–4.0	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	B	Ni-Cr-Lc	2.4–3.0	2.0 max	0.8 max	3.3–5.0	1.4–4.0	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	C	Ni-Cr-GB	2.5–3.7	2.0 max	0.8 max	4.0 max	1.0–2.5	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	D	Ni-HiCr	2.5–3.6	2.0 max	2.0 max	4.5–7.0	7.0–11.0	1.5 max	...	0.10 max	0.15 max
II	A	12 % Cr	2.0–3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	11.0–14.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
II	B	15 % Cr-Mo	2.0–3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	14.0–18.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
II	D	20 % Cr-Mo	2.0–3.3	2.0 max	1.0–2.2	2.5 max	18.0–23.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
III	A	25 % Cr	2.0–3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	23.0–30.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max

Paduan yang terdapat pada spesifikasi material ini diharapkan akan membentuk struktur mikro yang terdiri dari karbida, martensit, bainit, austenit, dan dalam kasus tertentu terdapat sedikit grafit atau perlit (ASTM A532, 2003). Di bawah ini merupakan nilai kekerasan dari beberapa kelas dan tipe material ASTM A532.

Tabel 2.4 Komposisi kimia ASTM A532 (ASTM A532, 2003)

Class	Type	Designation	<i>as cast or as Cast and Stress Relieved</i>		<i>Hardened or Hardened and Stress Relieved</i>				
			HB	HRC	HV	Level 1		Level 2	
						HB	HRC	HV	HRC
I	A	Ni-Cr-HiC	550	53	600	600	56	660	59
I	B	Ni-Cr-LoC	550	53	600	600	56	660	59
I	C	Ni-Cr-GB	550	53	600	600	56	660	59
I	D	Ni-HiCr	500	50	540	600	56	660	59
II	A	12 % Cr	550	53	600	600	56	660	59
II	B	15 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	59
II	D	20 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	59
III	A	25 % Cr	450	46	485	600	56	660	59

2.4 Baja

Baja adalah paduan besi dan karbon yang mungkin mengandung unsur paduan lainnya; ada banyak jenis paduan yang memiliki komposisi dan perlakuan panas yang berbeda. Pada

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



umumnya baja diklasifikasikan menurut konsentrasi karbon yaitu karbon rendah, menengah, dan tinggi. Baja karbon rendah mengandung kurang dari 0,25% karbon, baja karbon menengah mengandung konsentrasi karbon sebanyak 0,25-0,60%, sedangkan baja karbon tinggi biasanya terdiri atas 0,60-1,40% karbon. Selain itu baja juga dapat dikelompokkan berdasarkan kandungan unsur paduannya. Baja karbon biasa (*plain carbon steel*) yang hanya berisi konsentrasi karbon dan baja selain itu memiliki sedikit pengotor dan sedikit paduan manganese. Untuk baja paduan, unsur paduan ditambahkan untuk tujuan tertentu dengan konsentrasi tertentu. (Callister, 2010).

2.4.1 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Dalam besi cair karbon dapat larut, tetapi dalam keadaan padat kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Selain sebagai larutan padat, besi dan karbon juga dapat membentuk senyawa interstisial (*interstitial compound*), eutektik dan juga eutektoid, atau mungkin juga karbon akan terpisah (sebagai grafit). Karena itu diagram fase besi-karbon ada 2 macam, diagram fase besi – karbida besi dan diagram fase besi – grafit.

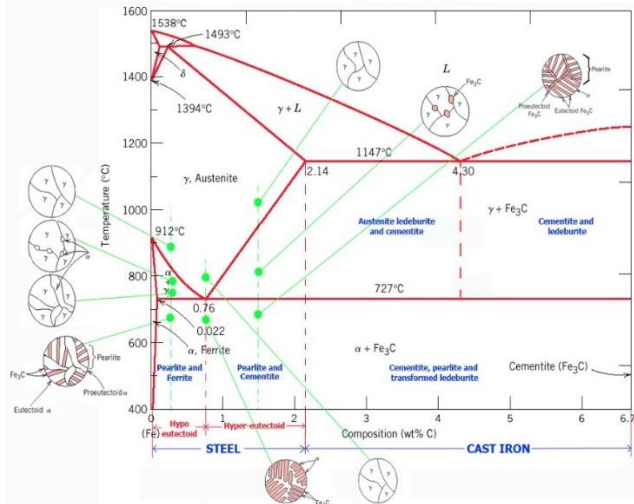
Diagram keseimbangan besi – karbon cukup kompleks, tetapi hanya sebagian saja yang penting bagi dunia teknik, yaitu bagian antara besi murni sampai senyawa *interstitial*-nya, karbida besi Fe₃C, yang mengandung 6,67 %C. dan diagram fase yang banyak digunakan adalah diagram fase besi – karbida besi, diagram Fe – Fe₃C.

Pada keadaan yang betul – betul ekuilibrium karbon akan berupa karbon bebas (grafit), sehingga akan diperoleh diagram kesetimbangan besi - grafit. Perubahan – perubahan dalam keadaan ekuilibrium berlangsung terlalu lama. Seharusnya karbida besi akan terjadi pada temperatur kamar (pada temperatur sekitar 700°C pun perubahan ini akan makan waktu bertahun – tahun). Dalam hal ini karbida besi dikatakan sebagai suatu struktur yang metastabil. Diagram fase besi – karbida dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Dari Gambar 2.1 tampak bahwa diagram fase ini memiliki tiga garis mendatar yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung secara *isothermal*, yaitu:

- Pada 1496°C, kadar karbon antara 0.10 – 0.50 %, berlangsung reaksi peritektik. $L + \delta \rightarrow \gamma$ (daerah ini tidak begitu penting untuk dunia teknik)
- Pada 1130°C, kadar karbon antara 2,0 – 6,67 %, berlangsung reaksi eutektik. $L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ (Avner, 1974)



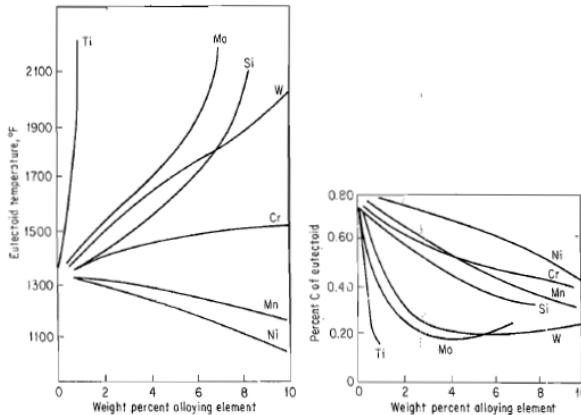
Gambar 2.4 Diagram fasa Fe- Fe_3C (Avner, 1974)

2.4.2 Pengaruh Unsur Paduan terhadap Diagram Fasa Fe- Fe_3C

Adanya unsur paduan di dalam baja akan merubah diagram fasa baja. Pada umumnya titik eutektoid akan tergeser ke kiri, sehingga kadar karbon di dalam perlit akan kurang dari 0,8%. Unsur paduan yang berfungsi sebagai penstabil austenit, yaitu Ni dan Mn, menurunkan temperatur eutektoid, sedangkan unsur paduan penstabil ferrit, akan menaikkan temperatur eutektoid (Gambar 2.5). Jadi unsur paduan penstabil ferrit akan menggeser



titik eutektoid ke kiri atas, sedang penstabil austenite menggeser titik eutektoid ke bawah. (Avner, 1974)



Gambar 2.5 Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutektoid (kiri) dan kadar dalam eutectoid (kanan) (Avner, 1974)

2.5 Besi Tuang (*Cast Iron*)

Secara umum, besi tuang merupakan bagian dari paduan besi dengan kadar karbon di atas 2,14%. Sebagian besar besi tuang mengandung antara 3,0-4,5% karbon, dengan tambahan beberapa unsur paduan (Callister, 2010). Besi tuang memiliki keuletan yang rendah, sehingga sulit untuk di-*machining*. Satu-satunya cara pembuatannya adalah dengan penuangan, karena itu disebut besi tuang. Penggunaan besi tuang cukup luas walaupun keuletannya lebih rendah dari baja, karena besi tuang memiliki beberapa sifat khusus yang berguna. Terutama jika dipadukan dengan unsur-unsur yang lain dengan perlakuan panas yang tepat.

Menurut Sidney H. Avner, secara umum besi tuang dikelompokkan menjadi:

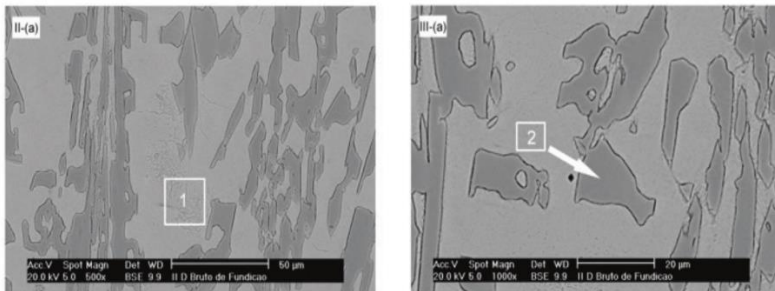
- Besi tuang putih (*white cast iron*), di mana seluruh karbon berupa sementit.



- b. Besi tuang mampu tempa (*malleable cast iron*), di mana karbonnya berupa *temper* karbon, dengan matriks perlitik atau ferritik.
- c. Besi tuang kelabu (*grey cast iron*), di mana karbonnya berupa grafit berbentuk *flake* (serpih) dengan matriks ferritik atau perlitik.
- d. Besi tuang nodular (*nodular cast iron*), di mana karbonnya berupa grafit nodular dengan matriks ferritik atau perlitik.

2.5.1 Besi Tuang Putih (*White Cast Iron*)

Besi tuang putih bersifat keras dan merupakan paduan yang getas dengan banyaknya kandungan austenite (1) dan Fe_3C (2) struktur mikronya dapat dilihat pada gambar 2.6. Permukaan yang patah dari material ini akan berwarna putih, sesuai dengan namanya. Kelompok besi tuang putih dengan kandungan paduan yang tinggi dibuat untuk memanfaatkan sifat kekerasan dan ketahanan ausnya. Unsur paduan yang ditambahkan di antaranya adalah kromium, nikel, dan molybdenum. Dengan penambahan unsur paduan tersebut karbida akan terbentuk pada saat proses solidifikasi, dan martensit akan terbentuk pada proses perlakuan panas. (Ortega-cubillos, 2015)



Gambar 2.6 Struktur mikro besi tuang putih sebelum perlakuan panas (Ortega-cubillos, 2015)



2.5.2 *High Chromium White Cast Iron*

Kandungan karbon yang normal untuk *high chromium white cast iron* adalah mulai 2,2% untuk komposisi eutektik, di mana sekitar 3,5% untuk 15% Cr dan 2,7% untuk 27% Cr (ASM Handbook Vol. 1, 1991).. *High chromium white cast iron* memiliki sifat ketahanan abrasi yang sangat baik sehingga dimanfaatkan untuk material *slurry pumps*, *brick molds*, *coal-grinding mills*, *rolling mill rolls*, peralatan *shot blasting*, komponen *quarrying*, serta *hard rock mining* dan *milling*. Dalam beberapa aplikasi, material ini juga diharapkan mampu menahan beban *impact* yang tinggi. Paduan ini diakui memiliki perpaduan yang baik untuk sifat keuletan dan ketahanan abrasi.

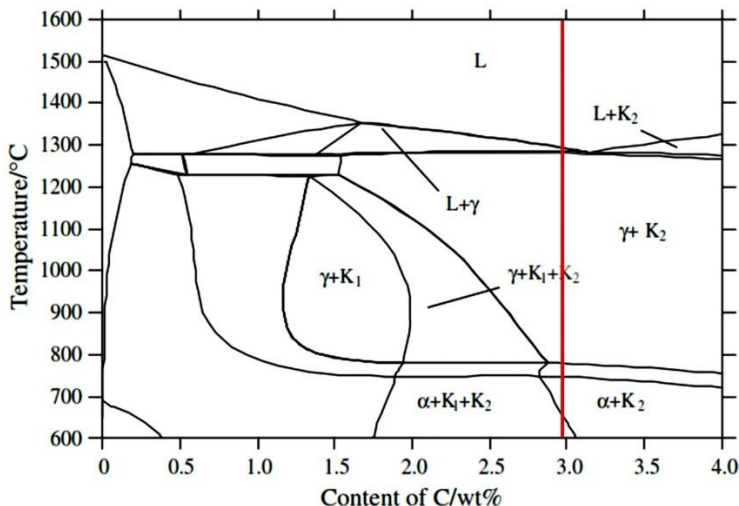
Karbida pada *high chromium white cast irons* sangat keras, getas, dan memiliki ketahanan aus yang baik. Secara umum ketahanan aus dapat ditingkatkan dengan menambahkan jumlah karbida (menambahkan komposisi karbon), sedangkan ketangguhan dapat ditingkatkan dengan meningkatkan jumlah *metallic matrix* (mengurangi komposisi karbon). (ASM Handbook Vol.4, 1991)

High chromium white cast iron merupakan besi cor putih dengan kandungan kromium yang tinggi, dimana kromium berperan sebagai penghalang terbentuknya grafit pada material besi cor (*cast iron*), selain itu kromium merupakan salah satu unsur pembentuk karbida yang cukup kuat, dimana unsur-unsur pembentuk karbida umumnya akan memberikan sifat kekerasan yang tinggi, dan memberikan ketahanan yang sangat baik. (Nurjaman, 2012)

Kandungan kromium yang tinggi pada material ini menyebabkan karbida Fe_3C pada besi cor putih menjadi tidak stabil, dan keberadaannya digantikan oleh $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ (karbida sekunder atau primer). Berdasarkan kandungan karbon dan krom, maka struktur mikro dari *high chromium white cast iron* dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu: *Eutectic Alloys*, *Hypoeutectic Alloys*, dan *Hypereutectic Alloys* (Nurjaman, 2012).



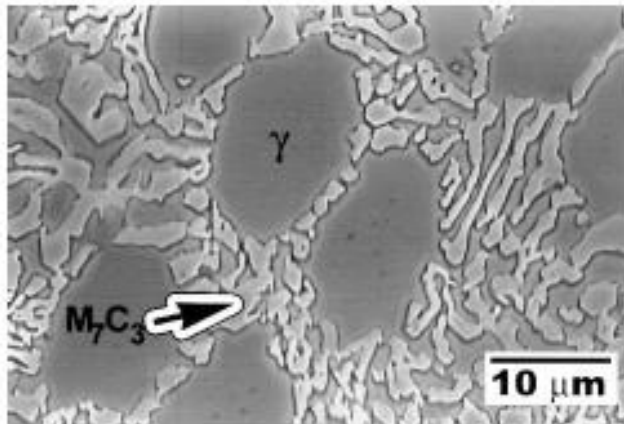
Material *liner* yang mengalami kegagalan termasuk dalam kelompok *high chromium white cast iron* dengan kandungan karbon sebanyak 2,99% dan kromium sebanyak 25,2%. Karena komposisi yang dimiliki, material *liner* termasuk ke dalam kelompok *hypoeutectic alloys*. Pada struktur *hypoeutectoid alloys*, memiliki kandungan karbon yang lebih rendah dari titik eutektik, dimana proses solidifikasi diawali dengan pembentukan dendrit dari matriks (austenite) pada rentang temperature solidifikasi tertentu hingga mencapai titik eutektik, kemudian dilanjutkan dengan pembentukan struktur eutektik (Nurjaman, 2012). Reaksi eutektik yang terjadi ialah $L \rightarrow \gamma + M_7C_3$. Walaupun sementit secara otomatis hilang karena tingginya kadar kromium pada *high chromium white cast iron*, sejumlah sementit masih mungkin untuk terbentuk (Cobos, et al, 2015). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.7 merupakan diagram fasa ekuilibrium dari *high chromium white cast irons* yang dihitung dengan menggunakan *Thermo-Calc Software*.



Gambar 2.7 Diagram fasa ekuilibrium Fe-Cr dengan kadar kromium 25% (Li, et al, 2008)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

High chromium white cast iron memiliki beberapa bentuk karbida, yaitu karbida primer dan eutektik. Solidifikasi dari karbida M_7C_3 pada *High chromium white cast iron* dibedakan menjadi dua macam, yaitu (1) M_7C_3 sebagai karbida primer pada *hypereutectic alloy* dan (2) karbida eutektik pada *hypereutectic* dan *hypoeutectic alloy* melalui reaksi eutektik. Umumnya, kondisi *as-cast* berupa ditunjukkan austenite (γ) dan lamellar austenite- M_7C_3 . Seperti pada gambar 2.8.

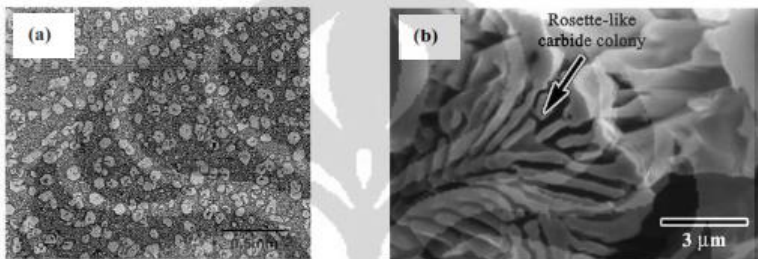


Gambar 2.8 Mikrostruktur *high chromium white cast iron as-cast*. (Bedolla-Jacuinde, 2005)

Karbida Primer memiliki bentuk hexagonal rod berupa karbida tunggal tanpa cabang dan memiliki kekerasan yang sangat tinggi namun ketangguhannya sangat rendah. Karbida eutektik merupakan karbida M_7C_3 dengan bentuk struktur hexagonal rod yang memiliki banyak cabang (*rosette likes*), seperti tampak pada gambar 2.9. *hypotactic alloys* memiliki kandungan karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan *hypereutectic alloys* sehingga memiliki ketangguhan yang lebih baik. Karbida sekunder dalam matriks pada material *high chromium white cast iron* dapat memberikan peningkatan signifikan terhadap kekerasan dan ketahanan gesek dari material tersebut. Karbida sekunder dapat berupa M_7C_3 atau $M_{23}C_6$ tergantung dari komposisi kromium



pada material tersebut dimana M_7C_3 akan terbentuk pada material dengan kandungan 15-25%Cr sedangkan $M_{23}C_6$ akan terbentuk bila kandungan kromium $>25\%$. Pembentukan karbida sekunder sangat dipengaruhi oleh proses perlakuan panas, hal ini berbeda dengan karbida primer dan eutektik, dimana karbida tersebut tidak akan terpengaruh baik morfologi maupun kuantitasnya oleh perlakuan panas. Austenisasi atau destabilisasi merupakan salah satu mekanisme pembentukan karbida sekunder pada material tersebut, dimana material dipanaskan hingga mencapai temperatur A_1 kemudian didinginkan secara cepat dalam kondisi udara terbuka. Mekanisme ini sangat dipengaruhi oleh kelarutan unsur kromium dalam matriks. Ketika proses austenisasi berlangsung, unsur kromium dalam matriks akan bereaksi dengan karbon membentuk senyawa karbida dalam matriks, sehingga kandungan karbon dalam matriks akan berkurang. Sedangkan pengaruh waktu tahan terhadap morfologi karbida, dimana semakin lama waktu tahan maka ukuran karbida akan semakin besar (*coarsening*). (Nurjaman, 2012) Menurut Wiengmoon, 2011, *high chromium white cast iron* memiliki rentang temperatur terbentuknya karbida kromium yaitu dengan komposisi $>15\%$ Cr dan pada temperatur 850°C - 1000°C pada proses austenisasi.



Gambar 2.9 Struktur mikro (a) Primary carbide M_7C_3 (b) Eutectic carbides M_7C_3 (Powell, 2003)

High chromium white cast iron mengalami beberapa reaksi solidifikasi dan berbagai macam reaksi transformasi pendinginan hingga temperatur kamar, serta selama pemanasan kembali pada temperatur tertentu di bawah garis solidus. Sehingga terdapat

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



beberapa fasa yang berbeda pada jenis material ini yang mempengaruhi sifat mekaniknya. Berikut beberapa reaksi transformasi yang telah diteliti yang terjadi pada *high chromium white cast iron*:

- a. Dendrit austenit primer pada paduan hipoeutektik.
- b. Karbida M_7C_3 primer pada paduan hipereutektik.
- c. Karbida eutektik dan austenit pada paduan hipoeutektik dan hipereutektik.
- d. Karbida peritektik pada paduan hipereutektik
- e. Presipitasi karbida sekunder saat pendinginan lambat setelah solidifikasi atau saat proses penuaan pada temperatur tertentu.
- f. Perlit yang terdiri dari karbida lamelar dan ferit saat pendinginan lambat.
- g. Dekomposisi austenit menjadi martensit saat pendinginan.
- h. Transformasi martensit temper menjadi ferit pada proses pemanasan kembali.
- i. Transformasi austenit sisa menjadi ferit pada proses pemanasan kembali.
- j. Transformasi ferit menjadi austenit pada proses pemanasan kembali.
- k. Disolusi perlit menjadi austenit pada proses pemanasan kembali.
- l. Disolusi karbida sekunder saat pemanasan kembali pada temperature ekstrim.

(Hinckley, et al, 2008)

Salah satu sifat mekanik yang dipengaruhi oleh fasa yang terbentuk pada *high chromium white cast irons* adalah kekerasan. Tabel 2.5 berikut menunjukkan perbandingan kekerasan dari setiap fasa pada *high chromium white cast irons*.



Tabel 2.1 Perbandingan Kekerasan Fasa yang Terbentuk pada *High Chromium White Cast Iron* (Kopycinski, 2014; Wiengmoon, 2011)

Fasa	Struktur Kristal	Nilai Kekerasan (HV)
Austenit	FCC	210
Perlit	-	265
Martensit	Tetragonal	940
Bainit	-	660
M ₃ C	Ortorombik	800-1100
M ₆ C	FCC	1200-1800
M ₇ C ₃	Hexagonal	1000-1800
M ₂₃ C ₆	FCC	1000

2.6 Analisis Kegagalan

Analisis kegagalan adalah sebuah proses dalam menentukan penyebab fisis yang menyebabkan permasalahan (ASM Handbook Vol. 11, 1991). Dalam ASM Handbook Vol. 11, 1991 kegagalan material secara fisik dapat dikategorikan menjadi satu dari sekian banyak sistem klasifikasi sebagai berikut.

- a. Distorsi atau deformasi yang tidak diinginkan
- b. *Fracture*
- c. Korosi
- d. *Wear*

Keempat kategori di atas mewakili bentuk umum dari kegagalan material, dan setiap bentuk kegagalan tersebut memiliki mekanismenya masing-masing.

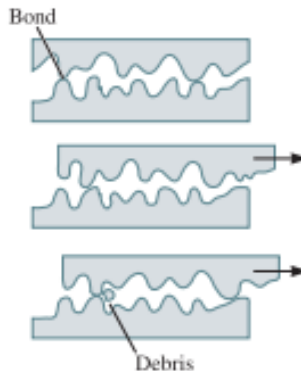
2.6.1 *Wear* (keausan)

a. *Adhesive Wear*

Perilaku ini terjadi apabila dua permukaan benda padat bergesekan antara satu dengan yang lain dengan tekanan. Permukaan akan terdeformasi secara plastis hingga bahkan mencair (*welded*) bersama. Mekanisme terjadinya *adhesive wear* ditunjukkan pada Gambar 2.10. Banyak hal yang dapat dilakukan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

untuk meningkatkan ketahanan aus dari material. Di antaranya yaitu mendesain komponen sehingga meminimalisir beban yang diterima, menghaluskan permukaan, dan pelumasan secara berkala. Selain itu, sifat dan struktur mikro dari material juga penting. Jika kedua permukaan material memiliki kekerasan yang tinggi, maka laju keausan akan rendah. Material keramik dengan kekerasan yang tinggi akan memiliki ketahanan aus adhesif yang baik.



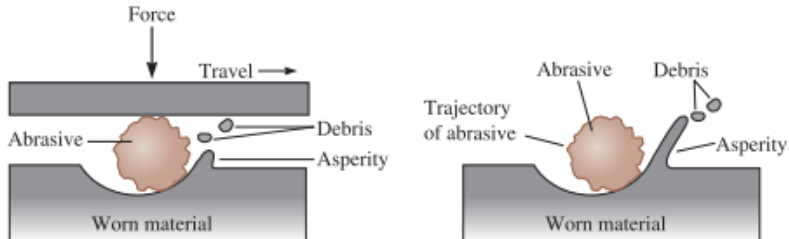
Gambar 2.10 Mekanisme *adhesive wear*. (Askeland, 2010)

b. Abrasive Wear

Apabila material pada permukaan berkurang akibat kontak dengan material yang keras, maka akan terjadi keausan abrasif. Jenis keausan ini sering terjadi pada komponen mesin seperti *crusher* dan *grinder*. Material yang memiliki kekerasan yang tinggi, ketangguhan yang baik, serta kekuatan yang tinggi akan memiliki sifat ketahanan aus abrasif yang baik. Menurut Ratia, 2015, pada *abrasive wear*, kekerasan adalah sifat yang paling penting untuk meningkatkan kemampuan suatu baja dalam ketahanan aus dikarenakan goresan. Makin keras material tersebut, makin sulit media *abrasive* untuk melakukan penetrasi dan menggores material tersebut. Berhubungan dengan mikrostruktur yang mana bila baja tersebut memiliki ukuran butir yang semakin



kecil akan memiliki ketahanan aus yang lebih baik, serta keberadaan karbida sekunder dalam matriks pada material *high chromium white cast iron* dapat memberikan peningkatan yang signifikan terhadap nilai kekerasan dan ketahanan gesek. (Nurjaman, 2012). Mekanisme *abrasive wear* ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Mekanisme *abrasive wear*. (Askeland, 2010)

Sebagai gambaran, kekerasan dari beberapa material abrasif dapat dilihat pada Tabel 2.6 berikut ini.

Tabel 2.6 Nilai Kekerasan dari Beberapa Material Abrasif
(Wiengmoon, 2011)

Material abrasif	Nilai Kekerasan (HV)
SiC	2600
VC	2000-3000
Al ₂ O ₃	1800
Silika	1430
Martensit karbon tinggi	500-1010

Jenis material yang biasa digunakan untuk aplikasi ketahanan aus abrasive biasanya adalah baja dengan perlakuan panas *quenching* dan *tempering*; baja dengan pengerasan permukaan; material komposit; besi tuang putih; dan material dengan permukaan keras yang diproduksi dengan pengelasan. Material keramik juga memiliki ketahanan aus yang baik karena kekerasannya yang tinggi. Namun, sifat getas yang dimiliki

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



terkadang membatasi penggunaannya dalam aplikasi keausan abrasif.

2.7 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Berdasarkan *ASM Metals Handbook vol. 11, 1991*, perlakuan panas merupakan kombinasi dari proses pemanasan dan pendinginan dalam waktu tertentu yang diaplikasikan pada paduan logam dalam keadaan solid untuk memperoleh sifat-sifat yang diinginkan. Secara umum perlakuan panas dibagi dalam tiga tahap, yaitu:

1. Pemanasan sampai suhu tertentu sesuai dengan proses heat treatment dan dengan kecepatan tertentu tergantung dari dimensi dan konduktifitas perpindahan panas benda kerja.
2. Mempertahankan suhu untuk waktu tertentu, sehingga temperaturnya merata pada seluruh bagian benda kerja.
3. Pendinginan dengan media pendingin yang bergantung pada proses heat treatment dan benda kerja. Pada baja karbon rendah dan sedang biasanya digunakan air sebagai media pendingin, karena laju pendinginannya cukup cepat sehingga terbentuk martensit. Sedangkan pada baja karbon tinggi dan baja paduan digunakan minyak sebagai media pendingin dengan laju pendinginan yang lebih lambat.

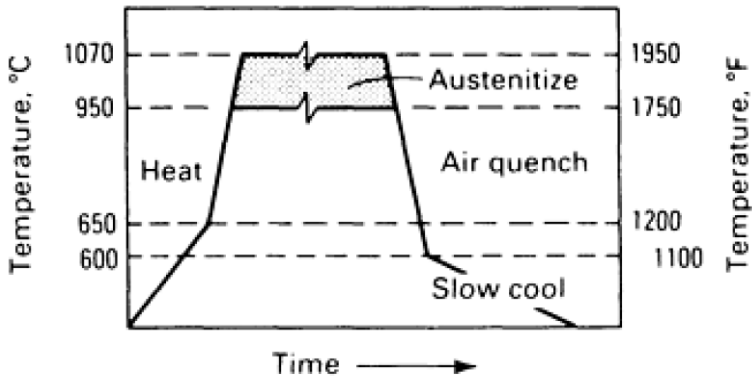
2.7.1 Pengerasan (*Hardenning*)

Pengerasan biasanya dilakukan untuk memperoleh sifat tahan aus yang tinggi, dan/atau kekuatan dan *fatigue limit/strength* yang lebih baik. Pengerasan dilakukan dengan memanaskan baja ke daerah austenit lalu mendinginkannya dengan cepat. Dengan pendinginan cepat ini terbentuk martensit, yang keras. Setelah pengerasan baja akan menjadi keras dan getas, karena itu pengerasan selalu diikuti dengan penemperan. (Avner, 1974)

Pada *high chromium white cast irons*, hasil optimal diperoleh dengan terbentuknya struktur martensit setelah perlakuan panas. Sifat ketangguhan dan ketahanan abrasi dapat ditingkatkan dengan perlakuan panas membentuk struktur



martensit. (ASM Handbook Vol.4, 1991). Gambar 2.12 berikut menunjukkan contoh skema perlakuan panas untuk pengerasan *high chromium white cast irons*.

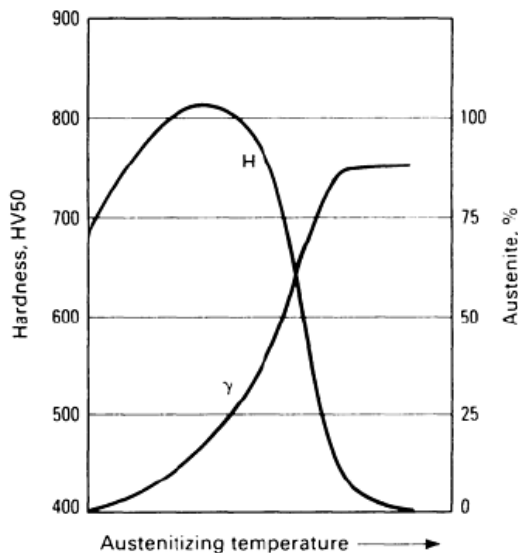


Gambar 2.12 Skema perlakuan panas untuk pengerasan *high chromium white cast irons* (ASM Handbook Vol.4, 1991)

2.7.2 Austenitisasi

Pada proses austenitisasi, baja dipanaskan sampai daerah austenit (γ) dan ditahan selama beberapa waktu tertentu untuk melarutkan karbida sampai menjadi larutan padat austenit. Untuk *high chromium white cast irons*, terdapat temperatur austenitisasi optimal untuk mencapai kekerasan yang maksimal dengan berbagai komposisi, seperti terlihat pada Gambar 2.13.

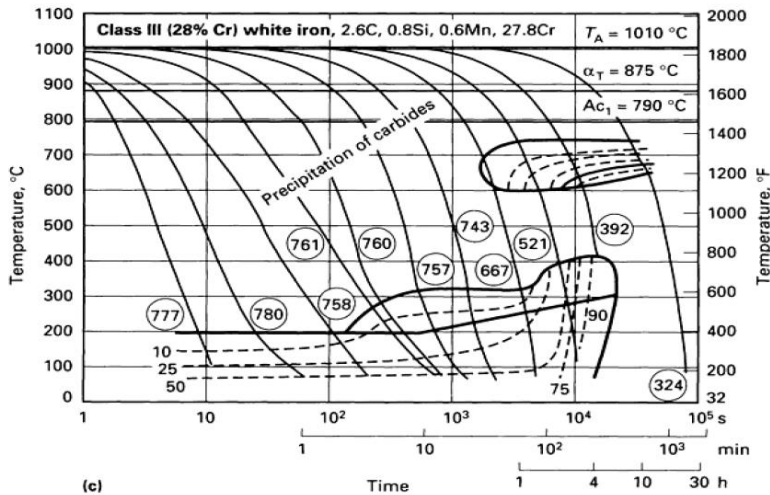
Temperatur austenitisasi menentukan banyaknya karbon yang tersisa dalam austenit. Temperatur yang terlalu tinggi meningkatkan kestabilan dari austenit, dan semakin tinggi austenit sisa yang ada akan mengurangi kekerasan. Temperatur yang rendah pada martensit karbon rendah menyebabkan berkurangnya kekerasan dan ketahanan abrasi. (ASM Handbook Vol.4, 1991)



Gambar 2.13 Pengaruh temperatur austenitisasi pada kekerasan (H) dan austenite sisa (γ) pada *high chromium white cast iron* (ASM Handbook Vol.4, 1991)

2.7.3 Pendinginan (*Quenching*)

Untuk mencapai struktur martensit (yang dituju dalam melakukan pengerasan) maka austenite yang sudah diperoleh harus didinginkan cukup cepat, setidaknya dapat mencapai laju pendinginan kritis dari baja yang bersangkutan. Dalam melakukan pendinginan ini maka benda kerja biasanya dicelupkan ke dalam suatu media pendingin yang berupa *liquid*. Walaupun ada juga jenis baja yang dapat dikeraskan dengan pendinginan di udara. Selama proses ini, panas dari benda kerja akan mengalir ke dalam media pendingin, sehingga temperatur benda kerja akan turun. Laju penurunan temperatur ditentukan oleh kecepatan aliran panas tersebut. (Avner, 1974) Untuk *high chromium white cast irons*, diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Diagram CCT untuk *class III (28% Cr) white cast iron* yang mengandung 2,6% C, 0,8% Si, 0,6% Mn, dan 27,8% Cr (ASM Handbook Vol.4, 1991)

2.7.4 Tempering

Baja yang dikeraskan dengan pendinginan celup menjadi martensit akan sangat keras tetapi juga getas. Dengan memanaskan kembali martensit ini akan bertransformasi menjadi berbagai produk transformasi yang lebih ulet. *Tempering* harus segera dilakukan biasanya sebelum baja mencapai temperatur kamar, sekitar 50-75 °C. *Tempering* dilakukan dengan memanaskan kembali martensit ke suatu temperatur dan menahan pada temperatur tersebut selama beberapa saat kemudian didinginkan kembali. Tingginya temperatur pemanasan dan lama waktu tahan sangat menentukan kekerasan yang terjadi setelah *tempering*. (Avner, 1974)

Pada *high chromium white cast iron*, disarankan untuk melakukan *tempering* pada temperatur antara 200-230 °C (400-450 °F) selama 2 sampai 4 jam untuk mengembalikan sedikit ketangguhan dalam struktur martensit, serta untuk menghilangkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



tegangan sisa. Struktur mikro setelah *hardening* biasanya mengandung austenit sisa sekitar 10-30%. Beberapa dari austenit sisa akan berubah pada proses *tempering* di temperature yang rendah. (ASM Handbook Vol.4, 1991)

2.8 Pengujian

2.8.1 Pengujian Kekerasan

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen (Dieter, 1987). Hal ini sering diartikan sebagai ukuran kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan nilai kekerasan material.

Pengujian yang sering dilakukan pada logam adalah pengujian kekerasan indentasi. Pada model ini kekerasan suatu material diukur terhadap tahanan plastis dari permukaan suatu material komponen konstruksi mesin dengan spesimen standart terhadap *indenter*. Terdapat berbagai macam uji kekerasan indentasi, antara lain: uji kekerasan *Brinell*, *Vickers*, *Rockwell* dan *Knoop*.

Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* menggunakan indenter berupa *diamond* yang berbentuk piramida dengan sudut 136° . Indenter *diamond* ditekan pada permukaan material sehingga dapat dilihat jejak berupa belah ketupat pada permukaan material. Nilai kekerasan *Vickers* dapat diperoleh dari rumus:

$$HV = 2P \sin \frac{\alpha}{2} = 1.8544P/d^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

P = Beban yang diberikan (Kgf).

D = Rata-rata diagonal hasil indentasi (mm).

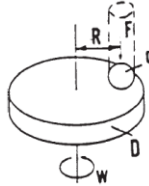
α = Sudut permukaan *diamond* = 136°

2.8.2 Pengujian Ketahanan Aus

Pengujian ini mengacu pada ASTM G99 mengenai metode pengujian standar untuk keausan dengan peralatan *pin on disk*.



Pengujian ini mencakup prosedur laboratorium untuk menentukan dan memperkirakan keausan material akibat gesekan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.15 Skema pengujian ketahanan aus dengan metode *pin on disk* (ASTM G99, 2003)

Gambar 2.15 menunjukkan gambar skema dari pengujian ketahanan aus menggunakan sistem *pin-on-disc*. Ada beberapa sistem yang biasa digunakan untuk sistem *pin-on-disc*, antara lain sistem terdiri dari poros yang bergerak dan penjepit untuk menahan *disk* yang berputar, tuas untuk menahan pin dan alat tambahan untuk menempatkan beban yang diberikan pada pin.

Pengujian ini dapat diaplikasikan pada berbagai jenis material, salah satu ketentuan yang dibutuhkan adalah spesimen memiliki dimensi tertentu yang dapat di persiapkan dan dapat menahan tekanan yang diberikan selama pengujian tanpa mengalami kegagalan. Bentuk pin secara khusus berbentuk silinder atau bola, dengan diameter antara 2-10 mm dan ukuran *disk* antara 30-100 mm, serta memiliki ketebalan dari 2-10 mm.

Ada beberapa parameter dalam pengujian ini. Yang pertama adalah *load* atau nilai dari gaya yang diberikan pada pin terhadap *disk* dalam satuan Newton. *Speed*, yaitu kecepatan pergeseran dari permukaan dari *pin* dan *disk* yang bersentuhan dalam meter per detik. *Distance*, merupakan jarak yang di tempuh selama pengujian berlangsung dalam meter. *Temperature*, yang spesifik pada lokasi dekat persentuhan antara *pin* dengan *disk*. Dan lingkungan yang dapat mempengaruhi pengujian ini.

Dalam melakukan pengujian, ada beberapa prosedur yang harus dilakukan. Di antaranya yaitu pertama, mempersiapkan spesimen dan membersihkannya dari berbagai pengotor yang ada

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



pada permukaan. Setelah itu, melakukan pengukuran dimensi (sampai ketelitian $2.5\mu\text{m}$) dan menimbang berat (sampai ketelitian $0,001\text{ g}$). Selanjutnya memasukkan *disk* ke *holding device* dan *pin* ke *holder*. Lalu memberikan pembebanan yang sesuai untuk *pin* terhadap *disk* dan menetapkan rpm yang dibutuhkan (harus konstan). Setelah persiapan selesai, maka pengujian dapat dilakukan.

Setelah melakukan pengujian, apabila dalam alat pengujian tidak terdapat suatu pencatat otomatis yang dapat langsung mengeluarkan hasil dari *volume loss* yang dihasilkan selama pengujian, maka harus dilakukan perhitungan untuk menentukan *volume loss*. Hasil dari pengujian ini disarankan dalam bentuk *volume loss* dalam mm^3 berdasarkan prosedur yang spesifik. Hasil yang didapat dari pengujian adalah *mass loss* berdasarkan perhitungan selisih antara massa awal dan massa akhir. Sementara, hasil *mass loss* hanya dapat digunakan dalam skala yang membandingkan dengan material dengan densitas yang sama, maka laporan yang dihasilkan dari pengujian aus ini berupa *volume loss* agar tidak menimbulkan kebingungan yang disebabkan oleh perbedaan densitas. Densitas didapatkan dari perhitungan awal sebelum melakukan pengujian. Untuk menghitung *volume loss*, maka digunakan persamaan berikut:

$$\text{mass loss/waktu} = \frac{\text{massa awal} - \text{massa akhir}}{\text{waktu ekspos material}} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{volume loss/waktu} = \frac{\frac{\text{massa loss}}{\text{massa jenis}}}{\text{waktu ekspos material}} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\text{thickness/waktu} = \frac{\text{luas permukaan material}}{\text{waktu ekspos material}} \dots\dots\dots(2.4)$$

(ASTM G99, 2003)

2.8.3 Pengujian XRD

Ada beberapa cara untuk menghitung kandungan austenite sisa dalam matriks martensit pada material besi dan baja, di antaranya adalah dengan menggunakan metalografi kuantitatif dan XRD (*X-Ray Diffractometer*). Untuk metalografi kuantitatif, keakuratan dari austenit sisa dibatasi jika kandungannya lebih dari



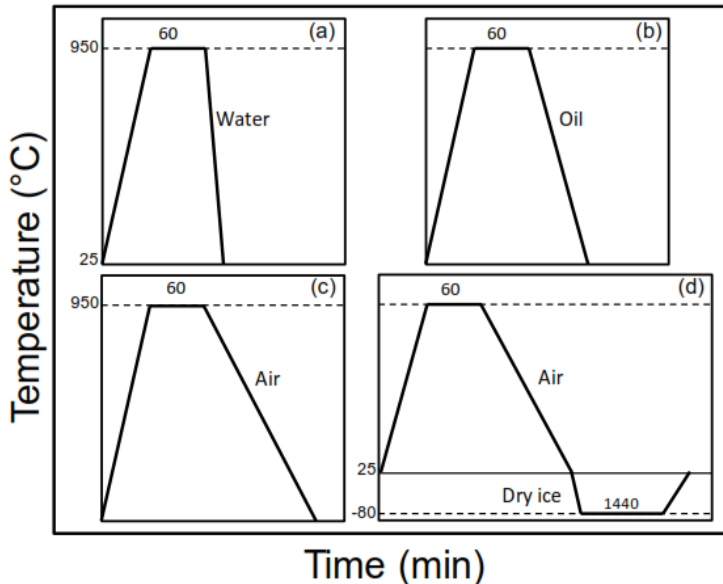
10% dalam matriks martensit, namun dengan analisis XRD akan diperoleh keakuratan yang lebih baik untuk kandungan austenit sisa kurang dari 10% bahkan hingga 0,5%. Untuk menghitung kandungan austenit sisa dengan menggunakan analisis XRD (dengan menggunakan sinar radiasi Cr-K α dan Mo-K α) mengacu pada ASTM E-975. (Nurjaman, 2012)

2.9 Penelitian Sebelumnya

2.9.1 *Improvement of Abrasive Wear Resistance of the High Chromium Cast Iron ASTM A-532 through Thermal Treatment Cycles*

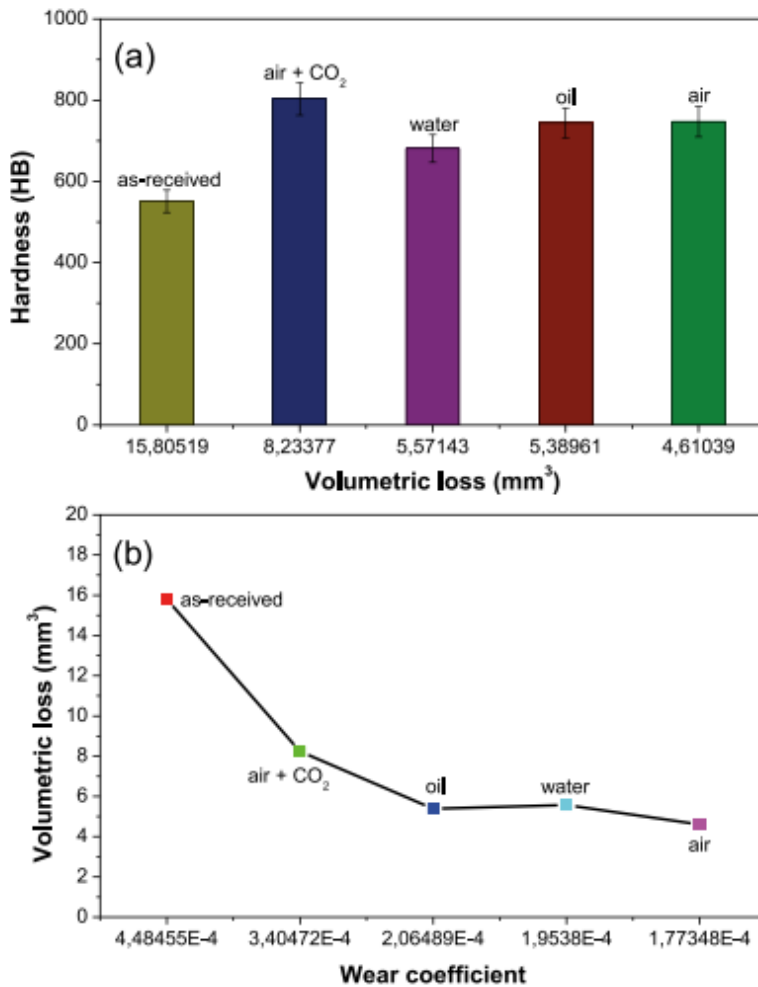
Berdasarkan literature, mikrostruktur dari *high chromium white cast iron*, mempengaruhi keausan. Untuk mendapatkan ketahanan aus yang lebih baik, *high chromium white cast iron* harus ada struktur martensite, Karena bentuk dari martensit dibandingkan dengan austenite, dapat mengurangi *cracking* dan keausan. Penelitian ini, bertujuan untuk manginvestigasi pengaruh media pendingin yang digunakan setelah proses *hardening* untuk meningkatkan ketahanan aus.

Sampel material dilakukan proses *hardening* pada temperature 950°C dan di holding selama 1 jam, lalu didinginkan paksa (*quenching*) dengan media pendingin yang berbeda, yaitu air, oli, udara, dan udara dilanjutkan dengan penggunaan *dry ice* sesuai dengan skema pada gambar 2.16. Perlakuan terakhir digunakan untuk mengetahui efek dari *supercooling* pada ketahanan aus. Selanjunya sampel diuji mekanik berupa uji abrasi sesuai dengan standar ASTM G65-00 dan uji kekerasan



Gambar 2.16 Skema perlakuan panas dengan menggunakan media pendingin yang berbeda (Higuera-Cobos, 2015).

Setelah *weight loss* ditentukan, maka *volume loss* didapatkan dari hasil perhitungan, yang mana lebih relevan apabila menggunakan massa jenis dari material (7700kg/m^3) sebagai perbandingan. Korelasi antara kekerasan dan keausan (*volume loss* dan *wear coefficient*) dapat dilihat pada gambar 2.17, dapat dilihat bahwa sampel dengan keadaan semula memiliki kekerasan yang lebih rendah dan mengalami *volumetric loss* yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel yang telah mendapatkan perlakuan panas.



Gambar 2.17 Korelasi antara kekerasan dan a) *volumetric loss* dan b) *wear coefficient* (Higuera-Cobos, 2015).

As-cast sampel menunjukkan kekerasan dan ketahanan aus yang lebih rendah. Setelah diberikan perlakuan panas, sampel

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



menunjukkan peningkatan dari karakteristik kekerasan dan ketahanan aus, diakibatkan oleh presiptasi dari *secondary carbides* di dalam matriks artensit dan penurunan jumlah austenis sisa. Sampel yang didinginkan menggunakan media pendingin udara menunjukkan hasil terbaik mengenai kekerasan dan ketahanan aus karea memiliki kombinasi antara austenite sisa dan presipitasi dari karbida krom yang baik.

2.9.2 Karakteristik Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Putih Paduan Krom Tinggi Hasil *Thermal Hardening* untuk Aplikasi *Grinding Ball*

Proses *heat treatment* diketahui sebagai cara yang paling baik untuk meningkatkan sifat mekanis dan sifat fisik dari besi tuang. Pada penelitian ini, proses heat treatment dilakukan pada *high chromium white cast iron*. Efek dari thermal hardening pada hardness dan struktur mikro dari *high chromium white cast iron* dengan komposisi 2,8% C, 22% Cr – 2,8% Ni diteliti pada temperatur austenisasi sebesar 950°C selama 5 jam, diikuti dengan *quenching* dengan menggunakan oli lalu emudia dilakukan penemperan pada temperatur 250°C, 300°C, dan 350°C. Pngujian yang dilakukan adalah pengujian kekerasan dengan metode *brinell* dan pengujian dengan mikroskop optic untuk menganalisis struktur mikro yang terbentuk.

Type II-A adalah jenis material *high chromium white cast iron* dengan kandungan karbon 2,3% dan kromium lebih dari 13,3%. Umumnya ASTM A532 *Type II-A* banyak digunakan sebagai *grinding ball*. Pada studi penelitian ini, proses perlakuan panas berupa *thermal hardening* dilakukan terhadap material ASTM A532 *Type II-A* untuk meningkatkan kekerasannya. Proses *quenching* menggunakan dua media *quenching* yang berbeda, yaitu oli dan udara paksa (udara ditiupkan secara langsung dari *fan*), sedangkan proses *tempering* dilakukan pada temperatur yang bervariasi yaitu 250 °C, 300 °C, dan 350 °C.

Pada Tabel 2.7 dapat dilihat bahwa pada kondisi *as-cast* nilai kekerasannya sebesar 410 BHN. Struktur yang terbentuk pada

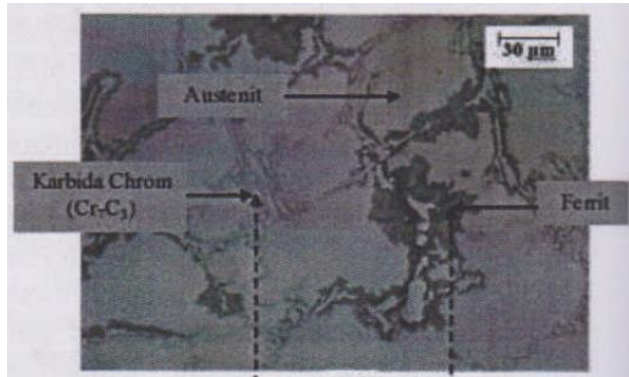


kondisi *as-cast* berupa matriks austenit, ferrit, dan karbida krom sepanjang batas butir austenit, seperti pada Gambar 2.18. Pada proses perlakuan panas dengan media pendingin oli dan variasi temperatur *tempering*, kekerasan optimal yang dicapai adalah dengan temperatur *tempering* 300 °C yaitu sebesar 723 BHN. Hal ini dikarenakan pada struktur mikronya terbentuk karbida krom yang lebih kasar, walaupun jumlah karbida krom tampak sedikit lebih banyak pada temperatur 250 °C (Gambar 2.19).

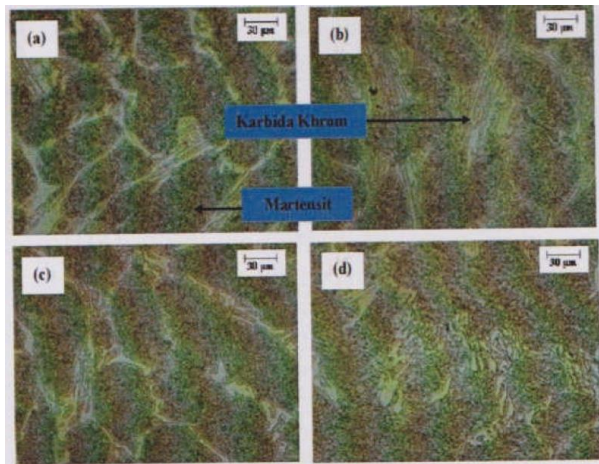
Untuk proses perlakuan panas dengan media pendingin udara paksa dan variasi temperatur *tempering*, kekerasan optimal yang dicapai adalah dengan temperatur *tempering* 250 °C yaitu sebesar 642 BHN, karena memiliki jumlah karbida yang paling besar dibanding temperatur *tempering* yang lain. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.20.

Tabel 2.7 Nilai kekerasan ASTM A532 *type* II-A pada berbagai media *quenching* dan variasi temperatur *tempering* (Astuti, 2015)

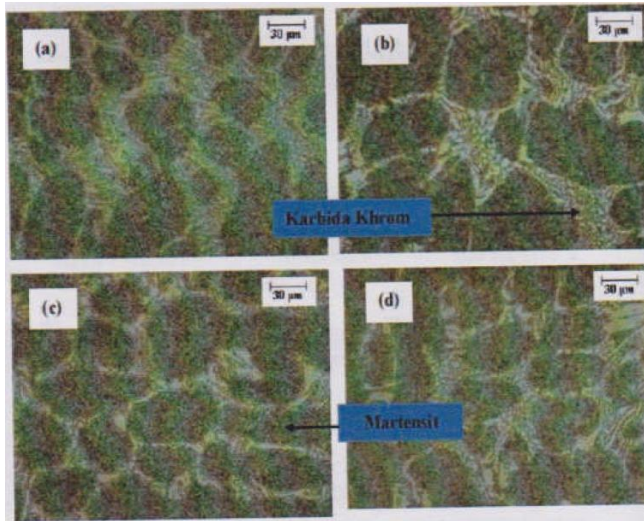
Jenis Perlakuan	Rata-rata Kekerasan (BHN)	
<i>As-cast</i>	410	
Media <i>Quenching</i>	Oli	Udara Paksa
<i>As-quenched</i>	660	619
<i>Tempering</i> 250 °C	688	642
<i>Tempering</i> 300 °C	723	603
<i>Tempering</i> 350 °C	690	566



Gambar 2.18 Struktur mikro material ASTM A532 *type II-A* dengan mikroskop optik pada kondisi *as-cast* (Astuti, 2015)



Gambar 2.19 Struktur mikro material ASTM A532 *type II-A* dengan media pendingin oli pada kondisi (a) *as-quenched* (b) *tempering 250 °C* (c) *tempering 300 °C* (d) *tempering 350 °C* (Astuti, 2015)



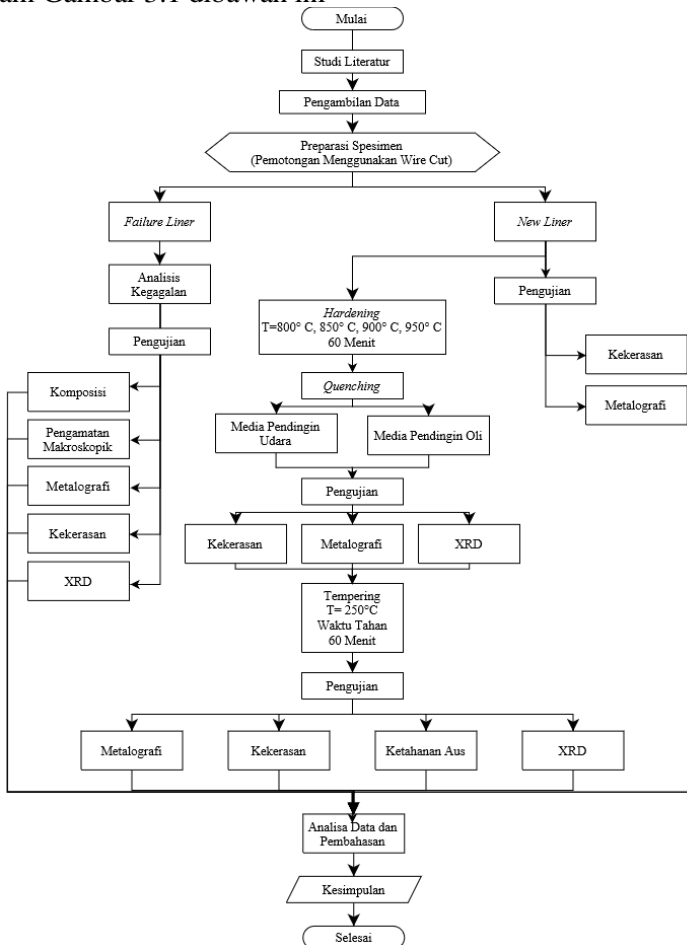
Gambar 2.20 Struktur mikro material ASTM A532 type II-A dengan media pendingin udara paksa pada kondisi (a) *as-quenched* (b) *tempering 250 °C* (c) *tempering 300 °C* (d) *tempering 350 °C* (Astuti, 2015)



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dibawah ini



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, pengujian dan studi literatur. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan

Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan/keausan yang terjadi pada komponennya di PT. Semen Indonesia, dan berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen pembimbing, dan pihak PT. Semen Indonesia yang ahli dibidangnya.

2. Studi Literatur

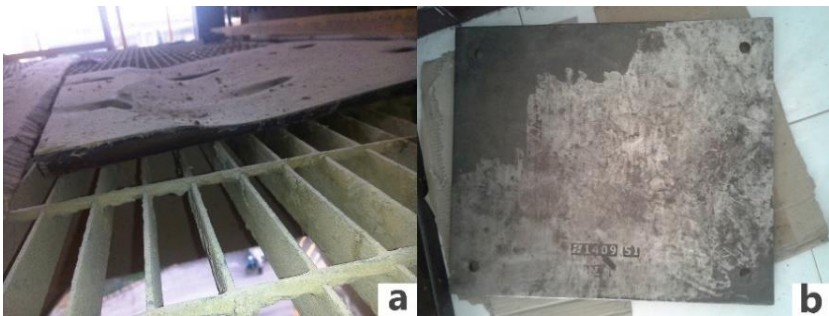
Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang permasalahan analisa kegagalan khususnya keausan *chute inlet feed liner* pada *Vertical Roller Mill*.

3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu : pengamatan material *lining* yang aus dengan mikroskop stereo, pengamatan mikro dengan mikroskop optik , uji komposisi dengan menggunakan spektrometer, uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan material *chute inlet feed liner* pada *Vertical Roller Mill* serta uji keausan untuk mengetahui perbandingan tingkat keausan sebelum dan sesudah diberi perlakuan.

3.3 Material yang digunakan

Pada bulan Desember 2016 ditemukan material *chute inlet feed liner* pada *Vertical Roller Mill* Pabrik Tuban 4 mengalami kegagalan berupa aus yang diperlihatkan pada Gambar 3.2 (a) dan pada Gambar 3.2 (b) merupakan material *chute inlet feed liner* dalam kondisi belum dipasang.



Gambar 3. 2 (a) *fail liner*, (b) *new liner*.

3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Penggaris
Digunakan untuk mengukur spesimen uji.
2. Mesin Wire Cut
Digunakan untuk memotong spesimen uji.



Gambar 3. 3 Mesin *wire cut*



3. Kamera Digital
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan/keausan secara makro dan dokumentasi selama penelitian. Kamera yang digunakan adalah merk Canon dengan tipe kamera *mirrorless* seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Kamera Digital

4. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
Menggunakan alat *Foundry-Master PRO* untuk mengetahui komposisi kimia penyusun dari material *Lining Chute Inlet Feed*.



Gambar 3. 5 Mesin OES



5. *Furnace*

Menggunakan *dielectric heating furnace* 2 untuk melakukan proses perlakuan panas pada material uji.



Gambar 3.6 *Furnace*

6. Mesin Uji Kekerasan

Digunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji.. Mesin uji kekerasan ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 *Universal Hardness Tester*



7. *Abrasive Paper SiC*

Digunakan amplas merk Fujistar untuk menghaluskan permukaan material saat preparasi pengujian struktur mikro dengan grade 60 hingga 2000.



Gambar 3.8 *Abrasive paper*

8. *Mesin Polish*

Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.



Gambar 3.9 *Mesin polish*

9. *Larutan Etsa*

Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi. Larutan etsa yang digunakan untuk *High Chromium Cast Iron* menurut *ASTM E 407* adalah nomor 88, dengan komposisi 10 ml HNO_3 , 20 ml HCl , dan 30 ml air.

10. *Mikroskop Optik*

Menggunakan mikroskop Olympus BX51M-RF untuk mendapatkan informasi struktur mikro/fasa yang terdapat



pada material uji. Mikroskop Optik ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Mikroskop Optik

11. Mesin Pengujian Ketahanan Aus
Digunakan untuk menentukan keausan dari suatu material yang diakibatkan oleh gesekan. Alat uji ketahanan aus ditunjukkan pada gambar 3.11



Gambar 3. 11 Alat uji ketahanan aus

12. Mesin X-Ray Diffractometer (XRD)
Menggunakan alat *Pan Analytical XRD* untuk mendapatkan informasi terkait senyawa yang terbentuk setelah proses perlakuan panas yang diberikan pada spesimen uji. Mesin X-Ray Diffractometer ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Mesin pengujian XRD

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data-data perusahaan yang berkaitan dengan *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill* sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu:

1. Desain *Lining Chute Inlet Feed*
2. Data operasi
3. Spesifikasi material yang seharusnya digunakan.
4. *Maintenance record*

3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap Persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan/keausan pada *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill* pada PT Semen Indonesia. Persiapan ini berupa proses *cutting* menggunakan mesin *wire cut*. Material *Lining* yang telah terpasang dan mengalami aus dipotong untuk mengetahui kondisi material setelah aus. Sementara material yang baru dan belum terpasang dipotong

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



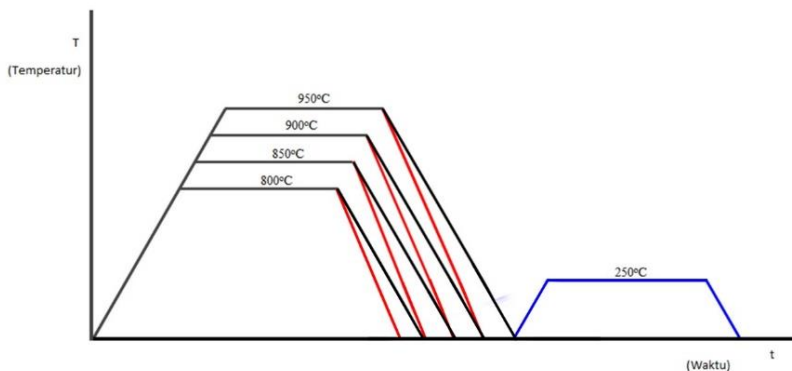
menjadi beberapa bagian untuk diuji sifat kekerasan, baik sebelum diberi perlakuan panas maupun setelah dilakukan proses perlakuan panas.

3.5.3 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan/keausan. Pada identifikasi komposisi kimia menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES)* di PT. Logamindo Sarimulia untuk mengetahui komposisi kimia pada *Chute Inlet Feed Liner Vertical Roller Mill*.

3.5.4 Proses Perlakuan Panas

Perlakuan panas yang dilakukan adalah dengan proses *hardening* dengan empat variasi temperature *hardening*, yaitu pada temperatur 950°C, 900°C, 850°C, 800°C dan di tahan pada temperatur tersebut selama 60 menit kemudian dilakukan proses *quenching* dengan media pendingin udara dan air. Kemudian dilakukan proses *tempering* pada temperatur 250°C selama 120 menit. Gambar 3.8 menunjukkan perlakuan panas pada penelitian ini.



Gambar 3. 13 Proses *hardening* dengan variasi temperatur dan media pendingin



3.5.5 Pengujian Metalografi

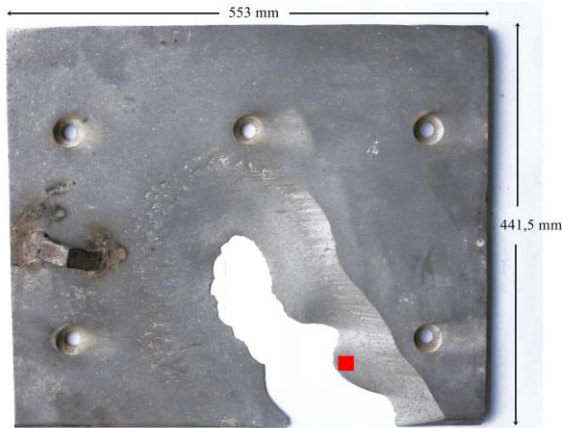
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari material uji yang mengalami kegagalan. Selain itu juga untuk mengetahui perbedaan struktur mikro material uji sebelum dan setelah dilakukan perlakuan panas. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus BX51M-RF di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material FTI-ITS.

3.5.6 Pengujian Kekerasan

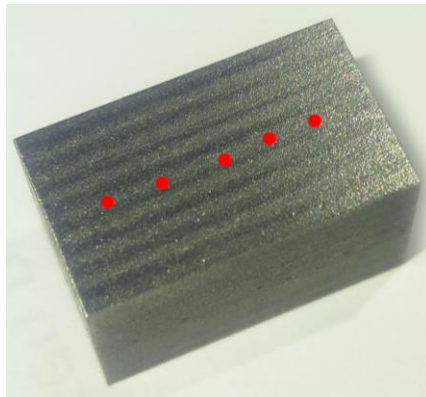
Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Vickers dimana dalam pengujiannya memakai indenter bola baja, pembebanan sebesar 100 kgf dan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS. Sebelumnya, sampel yang digunakan harus memiliki permukaan yang rata untuk menghindari cacat indentasi.

Pengujian Kekerasan dilakukan pada permukaan spesimen yang telah dilakukan proses perlakuan panas pada setiap tahapnya, yaitu masing-masing setelah dilakukan proses *hardening* dan *quenching* serta setelah proses *tempering*, serta pada material *new liner* dan *failure liner*. Letak spesimen pengujian kekerasan pada material *failure liner* dapat dilihat pada gambar 3.14. Untuk titik indentasi yang dilakukan pada spesimen material *new liner*, *fail liner*, dan yang setelah proses heat treatment dilakukan secara memanjang searah garis terpanjang, lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.15

Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 5 titik dengan ukuran spesimen 10mm x 10mm pada setiap spesimennya. Indentasi dilakukan secara *cross sectional* dengan beban sebesar 100 kgf. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada gambar 3.15.



Gambar 3. 14 Pembagian daerah indentasi uji kekerasan *Vickers*



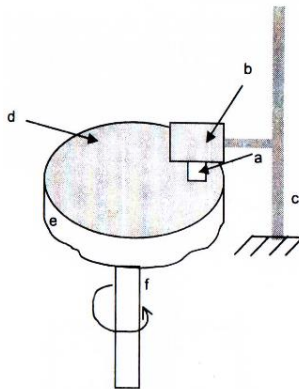
Gambar 3. 15 Daerah Indentasi Uji Kekerasan

3.5.7 Pengujian Ketahanan Aus

Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh perbandingan ketahanan aus dari material uji setelah diberi variasi perlakuan panas. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat *Pin-on-disc Tribometer*. Sebelum pengujian dilakukan, spesimen ditimbang berat awalnya, kemudian spesimen diletakkan pada sebuah *holder*. Setelah spesimen uji siap, spesimen kemudian



diekspos dengan sebuah piringan abrasif yang berputar dengan kecepatan 400-500 rpm selama 5 menit. Setelah itu, spesimen ditimbang berat akhirnya untuk mendapatkan nilai laju keausan per jam pada setiap spesimen. Pengujian ini mengacu pada ASTM G99 dengan metode *pin on disc*.



Gambar 3.16 Skema uji ketahanan aus material, (a) spesimen/*pin*, (b) beban, (c) *holder*, (d) material abrasif dapat berupa kertas amplas atau batu gerinda, (e) *disc*, (f) penyangga. (Yuswono, 2004).

Gambar 3.16 menunjukkan gambar skema dari pengujian ketahanan aus menggunakan sistem *pin-on-disc*. Ada beberapa sistem yang biasa digunakan untuk sistem *pin-on-disc*, antara lain sistem terdiri dari poros yang bergerak dan penjepit untuk menahan *disk* yang berputar, tuas untuk menahan pin dan alat tambahan untuk menempatkan beban yang diberikan pada pin.

Dalam melakukan pengujian, ada beberapa prosedur yang harus dilakukan. Di antaranya yaitu pertama, mempersiapkan spesimen dan membersihkannya dari berbagai pengotor yang ada pada permukaan. Setelah itu, melakukan pengukuran massa awal. Selanjutnya memasukkan *disk abrasive* ke *holding device* dan sampel ke *holder*. Lalu memberikan pembebanan yang sesuai dalam hal ini beban maksimal yang diberikan adalah 10% dari *compressive strength* dan menetapkan rpm yang dibutuhkan (harus

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



konstan). Setelah persiapan selesai, maka pengujian dapat dilakukan. Pengujian dilakukan dengan beberapa parameter, yaitu:

- a. *Load* : 2 Kilogram
- b. *Distance* : 500 m
- c. *Rotation* : 840-860 rpm
- d. *Abrasive* : KINIK Grinding Wheel A46QV

Hasil yang diperoleh dari pengujian ini berupa *mass loss*, yaitu perubahan massa sebelum dan setelah diekspos selama beberapa jarak atau waktu tertentu pada material abrasif. Namun, agar dapat dibandingkan dengan material lain yang memiliki massa jenis berbeda, maka dapat digunakan hasil berupa *volume loss*. Kemudian dibagi dengan luas permukaan material yang terekspos dengan material abrasive hingga didapatkan laju keausan material *liner*.

3.5.8 Pengujian X-Ray Diffractometer (XRD)

Pengujian ini dilakukan untuk mengidentifikasi fasa dalam struktur mikro setelah dilakukan proses perlakuan panas. Adapun parameter dari pengujian XRD yang digunakan adalah sebagai berikut:

- e. Sinar radiasi : Cu-K α
- f. 2θ range : 10 – 90 derajat
- g. Scan speed : 2 derajat/menit

Pengujian dengan sistem karakterisasi oleh difraksi Sinar-X (XRD) yang dilakukan menggunakan alat *Pan Analytical XRD* di Laboratorium Karakterisasi Departemen Teknik Material FTI-ITS. Tahap pertama yang dilakukan dalam analisis sinar-X adalah melakukan analisis pemeriksaan terhadap sampel yang belum diketahui strukturnya. Sampel ditempatkan pada titik fokus hamburan sinar-X yaitu tepat di tengah-tengah *plate* yang digunakan sebagai tempat yaitu sebuah plat tipis yang berlubang di tengah berukuran sesuai dengan sampel (pelet) dengan perekat pada sisi sebaliknya.



3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3. 1 Rancangan penelitian

Material	Temperatur (°C)	Media Pendingin	Uji Komposisi	Uji Kekerasan	Uji Metallografi	Uji Abrasi	Uji XRD
Fail Liner	-	-	-	√	√	-	√
New Liner	-	-	√	√	√	-	-
Liner H800-O	800	Oli	-	√	√	√	√
Liner H800-A	800	Udara	-	√	√	√	√
Liner H850-O	850	Oli	-	√	√	√	√
Liner H850-A	850	Udara	-	√	√	√	√
Liner H900-O	900	Oli	-	√	√	√	√
Liner H900-A	900	Udara	-	√	√	√	√
Liner H950-O	950	Oli	-	√	√	√	√
Liner H950-A	950	Udara	-	√	√	√	√
Liner H800-O-T	250	Udara	-	√	√	√	√
Liner H800-A-T	250	Udara	-	√	√	√	√
Liner H850-O-T	250	Udara	-	√	√	√	√
Liner H850-A-T	250	Udara	-	√	√	√	√
Liner H900-O-T	250	Udara	-	√	√	√	√
Liner H900-A-T	250	Udara	-	√	√	√	√
Liner H950-O-T	250	Udara	-	√	√	√	√
Liner H950-A-T	250	Udara	-	√	√	√	√

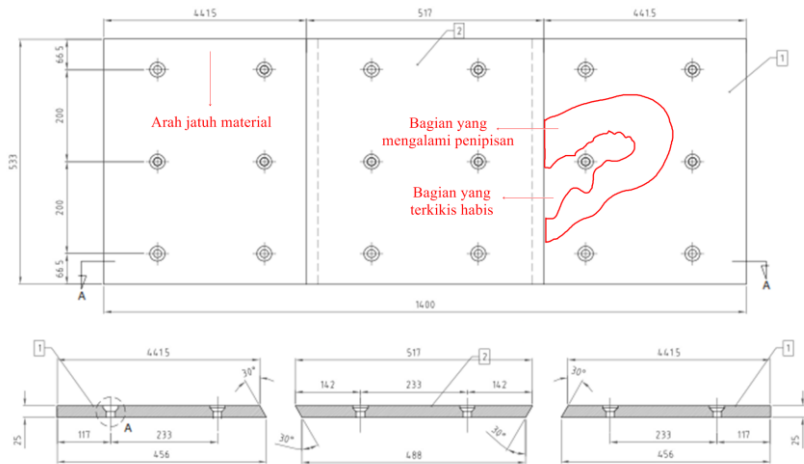


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Data Kegagalan Material

4.1.1. *Record Chute Inlet Feed Liner* pada *Vertical Roller Mill*

Pada tanggal 30 Desember 2016, PT. Semen Indonesia sedang melaksanakan maintenance rutin. Kemudian pada *vertical roller mill* Tuban 4 dilakukan overhaul, termasuk pada bagian *chute inlet feed liner*. Berdasarkan desain dari FLSmidth komponen ini memiliki umur pakai selama 1 tahun dan hanya mampu bertahan selama 9 bulan.



Gambar 4. 1 *Liner Chute Assembly*

Material *liner* ketika terpasang pada *chute inlet feed*, terdiri atas 9 buah liner yang tersusun dalam tiga baris dan tiga kolom. Gambar 4.1 menunjukkan material *liner* yang tersusun atas 1 baris. Material *liner* yang didapatkan untuk penelitian ini terpasang pada baris kedua bagian kanan. Pada gambar 4.1 juga menunjukkan arah jatuhnya material yaitu tegak lurus terhadap garis horizontal dengan sudut kontak terhadap material *liner* sebesar 45° , serta bagian yang mengalami penipisan dengan berkurangnya ketebalan pada *liner* dan bagian yang telah terkikis habis.

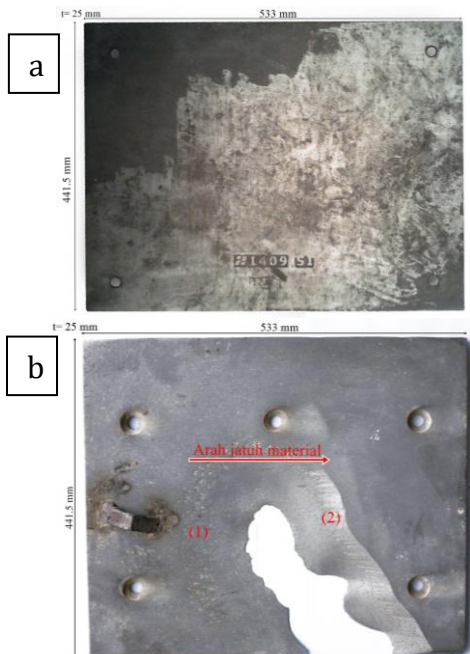


Tabel 4. 1 Data Operasi *Chute Inlet Feed Liner*

Debit raw material	700 ton/jam
Temperatur kerja	80-100°C
Lifetime	12 Bulan
Sudut	45°

4.1.2. Pengamatan Makroskopis Pada *Chute Inlet Feed Liner* yang Mengalami Kegagalan

Berdasarkan hasil pengamatan visual secara makroskopik menggunakan bantuan kamera DSLR. Dimensi awal material liner adalah 553 mm x 441,5 mm x 25mm, namun setelah digunakan selama 9 bulan mengalami pengurangan ketebalan dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Material liner: (a) *new liner* (b) *failure liner*.



Pada gambar 4.2, liner yang mengalami keausan menunjukkan pola garis memanjang searah dengan garis jatuhnya material di bagian bawah, menunjukkan tempat material tersebut jatuh ke dalam *vertical roller mill*. Untuk lebih jelasnya mengenai perubahan ketebalan dapat dilihat pada gambar 4.3



Gambar 4. 3 (a) penampang permukaan liner yang mengalami kegagalan, (b) pengurangan ketebalan material *liner*.

4.1.3. Hasil Uji Komposisi Material *Liner*

Uji Komposisi kimia menggunakan *OES (Optical Emission Spectroscopy)* pada material liner. Pengujian dilakukan untuk mengetahui komposisi pada komponen material *liner* yang. Hasil pengujian komposisi kimia ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 menunjukkan komposisi kimia pada sampel material liner. Berdasarkan hasil pengujian komposisi diatas, menunjukkan komposisi yang sesuai dengan ASTM A532 Class IIIA dimana standar ini tidak sesuai dengan material standar untuk *chute inlet feed liner* yang sesuai dengan standard. Komposisi untuk *liner* yang sesuai dengan standar yaitu *Ni-Hard*.



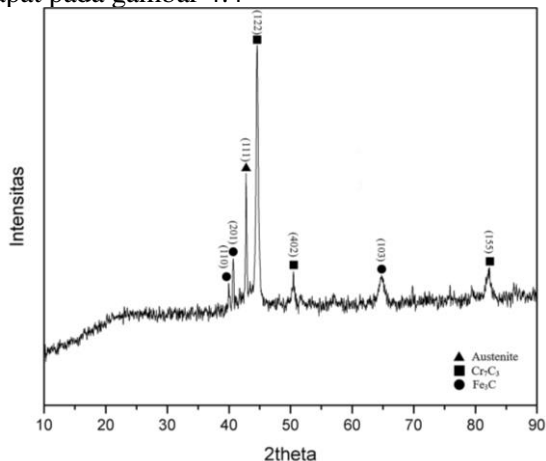
Tabel 4. 2 Hasil Komparasi Uji Komposisi

Grade	Chemical composition							
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
Material	2,78	0.802	0.57	0.026	0.037	0.27	24,5	0.63
Liner			4			2		7
Ni-hard 1	3,0-3,6	0,3-0,5	0,3-0,7	max 0,15	max 0,30	3,3-4,8	1,5-2,6	0-0,4
Ni-hard 2	max 2,9	0,3-0,5	0,3-0,7	max 0,15	max 0,30	3,5-5,0	1,4-2,4	0-0,4
Ni-Hard 4	2,6-3,2	1,8-2,0	0,4-0,4	max 0,1	max 0,01	4,5-6,5	8,0-9,0	0-0,4
ASTM A532	2,0-	max 1,5	max	max	max	max	23-	max
ClassIIIA	3,3		2,0	0,06	0,1	2,5	30	3,0

*in special cases

4.1.4. Hasil Pengujian XRD pada Material *Liner* yang Mengalami Kegagalan

X-Ray Diffraction dilakukan untuk menganalisis senyawa yang terdapat pada material *liner* yang mengalami kegagalan. Dari hasil XRD diperoleh *peak-peak* dengan intensitas tertentu. *Peak-peak* yang memiliki intensitas tertinggi dicocokkan dengan kartu PDF untuk mengetahui fasa atau senyawa apa yang terdapat pada sampel. Berikut merupakan hasil pengujian XRD pada material *liner* terdapat pada gambar 4.4



Gambar 4. 4 Grafik XRD material *liner* yang mengalami kegagalan



Pada gambar 4.4 disajikan hasil XRD dengan *peak* tertinggi yaitu senyawa *Carbon Kromium* dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta=44,5629^\circ$ dengan *peak height* sebesar 835,68 cts. Kemudian untuk *peak height* tertinggi kedua sebesar 475,78 cts pada $2\theta=42,7680^\circ$ yang dimiliki oleh *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-079-4902 yang muncul pada $2\theta=40,7207^\circ$ dengan *peak height* 156,03 cts. Untuk lebih jelasnya pada tabel 4.3

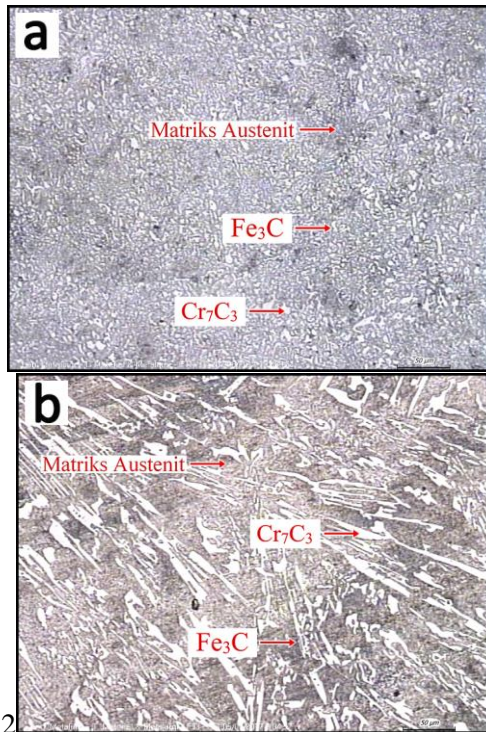
Tabel 4. 3 Daftar *Peak* Hasil Uji XRD *failure liner*

Pos. [$^\circ 2\theta$.]	Height [cts]	Fasa	Nomor ICCD
39.9968	74.06	Fe_3C	01-077-9136
40.7207	156.03	Fe_3C	01-079-4902
42.7680	475.78	Austenite	00-052-0513
44.5629	835.68	Cr_7C_3	00-006-0683
50.5141	70.34	Cr_7C_3	00-011-0550
64.7855	82.14	Fe_3C	01-089-7244
82.1468	78.54	Cr_7C_3	01-089-7244

4.1.5. Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Material *Liner* yang Mengalami Kegagalan

Material *new liner* dna yang telah mengalami kegagalan diamati bentuk struktur mikronya menggunakan mikroskop optic.

Hasil pengujian struktur mikro dapat dilihat pada gambar 4.5, dengan gambar (a) adalah material *liner* baru, gambar (b) adalah material *liner* yang mengalami penipisan. Ketiga material menunjukkan beberapa fasa yang sama, yaitu matriks austenit yang berupa dendrit yang berwarna paling gelap, kemudian karbida eutektik, Cr_7C_3 yang berwarna paling terang, serta lamelar antara austenit, karbida primer Fe_3C , dan karbida Cr_7C_3 yang berwarna paling gelap.



Gambar 4. 5 Struktur mikro material *liner* (a) new, (b) *failure*. Perbesaran 200x.

4.1.6. Hasil Pengujian Kekerasan pada Material *Liner* yang Mengalami Kegagalan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan dari material *liner* yang mengalami kegagalan. Pengujian dilakukan dengan indentasi sebanyak 5 titik pada material *new liner* dan 5 titik pada material *failure liner*.. Pengujian kekerasan yang digunakan adalah pengujian *Vickers* dengan beban sebesar 100 kgf.

Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengujian kekerasan pada material *liner*. Terlihat bahwa nilai rata-rata kekerasan pada material *liner* yang mengalami kegagalan meningkat bila

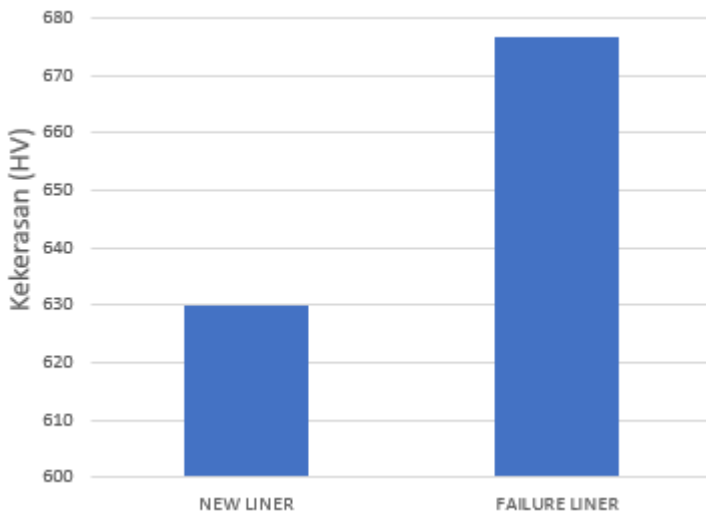
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



dibandingkan dengan material *new liner*. Nilai kekerasam dari adalah sebesar 677 HV. Nilai kekerasan dari *failure liner* cukup berbeda dengan material *liner* baru yang memiliki nilai kekerasan sebesar 630 HV, terdapat selisih nilai yang cukup signifikan yaitu sebesar 46-47 HV. Gambar 4.6 menunjukkan grafik peningkatan nilai rata-rata kekerasan tersebut.

Tabel 4. 4 Hasil Uji Kekerasan *new* dan *failure liner*

Nama Spesimen	Kekerasan (HV)
<i>New Liner</i>	630
<i>Failure Liner</i>	677



Gambar 4. 6 Grafik nilai kekerasan *new liner*, *failure liner* (tipis), *failure liner* (patah)

4.2. Hasil Proses Perlakuan Panas Material *Liner* Setelah Proses *Hardening*

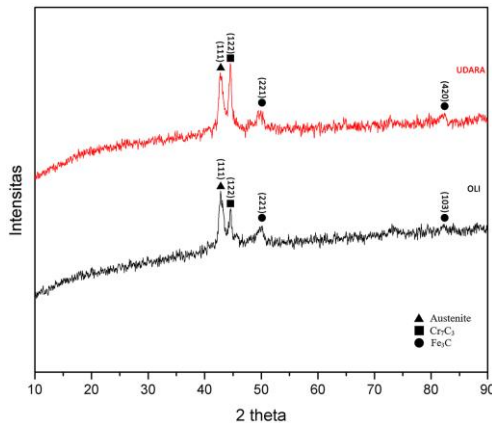
Pada penelitian ini dilakukan upaya heat treatment untuk memperbaiki sifat kekerasasn dari komponen tersebut agar mendekati standar seharusnya. Heat treatment dilakukan pada



temperatur 950°C, 900°C, 850°C, 800°C dengan waktu tahan 60 menit menggunakan media pendingin oli dan udara. Selanjutnya dilakukan proses *tempering*.

4.2.1. Hasil Pengujian XRD pada Material *Liner* Setelah Proses *Hardening*

Pengujian *X-Ray Diffraction* dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material FTI-ITS. Bertujuan untuk mengidentifikasi fasa yang ada pada material *liner* setelah proses *hardening*.

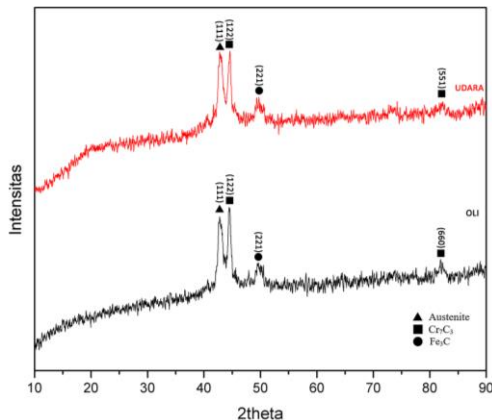


Gambar 4. 7 Grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 800°C

Gambar 4.7 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 800°C dengan variasi media pendingin oli dan udara. Pada temperature *hardening* 800°C dengan media pendingin oli disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 01-071-4407 sebesar 208,61 cts pada $2\theta = 42,8225^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr₇C₃) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5572^\circ$ dengan *peak height* sebesar 129,87 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe₃C) dengan kartu PDF 01-078-5298 yang



muncul pada $2\theta = 49,9162^\circ$ dengan *peak height* 50.68 cts dan dengan kartu PDF 01-077-9135 pada $2\theta = 82,0781^\circ$ dengan *peak height* 21.11 cts. Lalu pada temperature *hardening* 800°C dengan media pendingin udara disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 219,09 cts pada $2\theta = 42,7049^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5226^\circ$ dengan *peak height* sebesar 255,13 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 yang muncul pada $2\theta = 49,85^\circ$ dan kartu PDF 01-078-5298 yang muncul pada $2\theta = 82,33^\circ$.

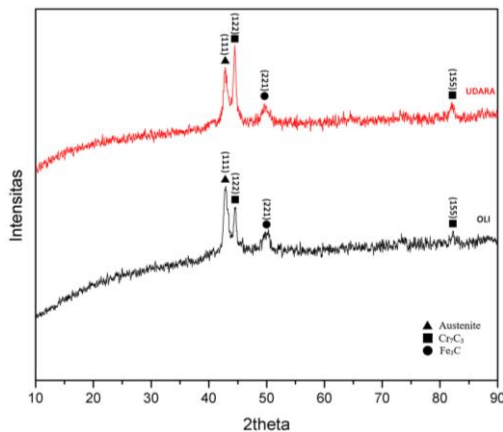


Gambar 4. 8 Grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 850°

Gambar 4.8 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 850°C dengan variasi media pendingin oli dan udara. Pada temperature *hardening* 850°C dengan media pendingin oli disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 186,09 cts pada $2\theta = 42,6434^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,4998^\circ$ dengan *peak height* sebesar 222,75 cts dan kartu PDF 00-036-0482



terdapat pada $2\theta = 81.80^\circ$. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 yang muncul pada $2\theta = 49.50^\circ$. Lalu pada temperature *hardening* 850°C dengan media pendingin udara disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 176,32 cts pada $2\theta=42,7122^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta=44,5910^\circ$ dengan *peak height* sebesar 201,09 cts dan kartu PDF 01-071-3789 pada $2\theta = 82,55^\circ$. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 yang muncul pada $2\theta = 49,626^\circ$.



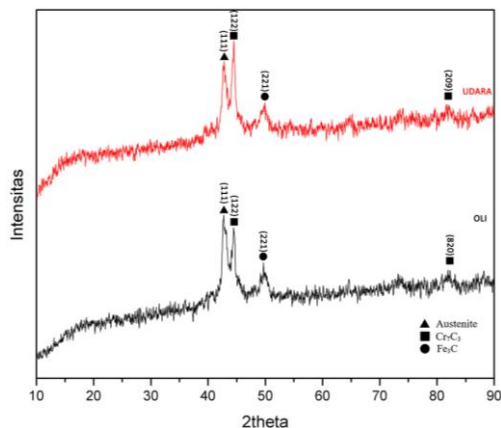
Gambar 4. 9 Grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 900°C

Gambar 4.9 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 900°C dengan variasi media pendingin oli dan udara. Pada temperature *hardening* 900°C dengan media pendingin oli disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 01-071-4407 sebesar 248,19 cts pada $2\theta = 42,8006^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5581^\circ$ dengan *peak height* sebesar 165,44 cts dan kartu PDF 01-089-7244 pada $2\theta = 82,3^\circ$. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide*

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



(Fe_3C) dengan kartu PDF 01-078-5298 yang muncul pada $2\theta = 50,2916^\circ$ dengan *peak height* 60,02 cts. Lalu pada temperature *hardening* 900°C dengan media pendingin udara disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 195,33 cts pada $2\theta = 42,7758^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5082^\circ$ dengan *peak height* sebesar 296,52 cts, serta kartu PDF 01-089-7244 dengan $2\theta = 82,2202^\circ$ dan *peak height* sebesar 41.87 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 yang muncul pada $2\theta = 49,59^\circ$.



Gambar 4. 10 Grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 950°C

Gambar 4.10 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 950°C dengan variasi media pendingin oli dan udara. Pada temperature *hardening* 950°C dengan media pendingin oli disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 215,44 cts pada $2\theta = 42,7250^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5568^\circ$ dengan *peak height* sebesar 165,27 cts serta kartu PDF 01-071-3789 pada $2\theta = 83,17^\circ$. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron*



Carbide (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 yang muncul pada $2\theta = 49,7991^\circ$ dengan *peak height* 52.05 cts. Lalu pada temperature *hardening* 950°C dengan media pendingin udara disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 158,75 cts pada $2\theta = 42,7109^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,4887^\circ$ dengan *peak height* sebesar 240,79 cts serta kartu PDF 01-071-3789 pada $2\theta = 84,45^\circ$ dengan *peak height* 14.61 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 yang muncul pada $2\theta = 49,69^\circ$. Untuk dapat lebih jelas membandingkan *peak* yang muncul setelah proses *hardening*, dapat dilihat pada tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kekerasan pada material *liner* yang telah di *hardening*.

Kode Spesimen	2theta	Fasa	ICDD Card	Peak Height (cts)
H800-O	42.8225	Austenite	00-052-0513	208.61
	44.5572	Cr_7C_3	00-006-0683	129.87
	49.9162	Fe_3C	01-078-5298	50.87
	82.0781	Fe_3C	01-077-9135	21.11
H800-A	42.7049	Austenite	00-052-0513	219.09
	44.5226	Cr_7C_3	00-006-0683	255.13
	49.83	Fe_3C	01-077-9135	122.22
	81.8	Fe_3C	01-078-5298	83.33
H850-O	42.6434	Austenite	00-052-0513	186.09
	44.4998	Cr_7C_3	00-006-0683	222.75
	49.5	Fe_3C	01-077-9135	99.85
	81.8	Fe_3C	00-036-0482	77.78
H850-A	42.7122	Austenite	00-052-0513	176.32
	44.591	Cr_7C_3	00-006-0683	201.09
	49.626	Fe_3C	01-077-9135	83.33

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



	82.5	Cr ₇ C ₃	01-071-3789	55.56
H900-O	42.8006	Austenite	01-071-4407	248.19
	44.5581	Cr ₇ C ₃	00-006-0683	165.44
	50.2916	Fe ₃ C	01-078-5298	60.02
	82.3	Cr ₇ C ₃	01-089-7244	56.42
H900-A	42.7758	Austenite	00-052-0513	195.33
	44.5082	Cr ₇ C ₃	00-006-0683	296.52
	49.59	Fe ₃ C	01-077-9135	53.25
	82.2202	Cr ₇ C ₃	01-089-7244	41.87
H950-O	42.725	Austenite	00-052-0513	215.44
	44.5568	Cr ₇ C ₃	00-006-0683	165.27
	49.7991	Fe ₃ C	01-077-9135	52.05
	83.17	Cr ₇ C ₃	01-071-3789	31.8
H950-A	42.7109	Austenite	00-052-0513	158.75
	44.887	Cr ₇ C ₃	00-006-0683	240.79
	49.69	Fe ₃ C	01-077-9135	65.4
	84.4556	Cr ₇ C ₃	01-071-3789	14.61

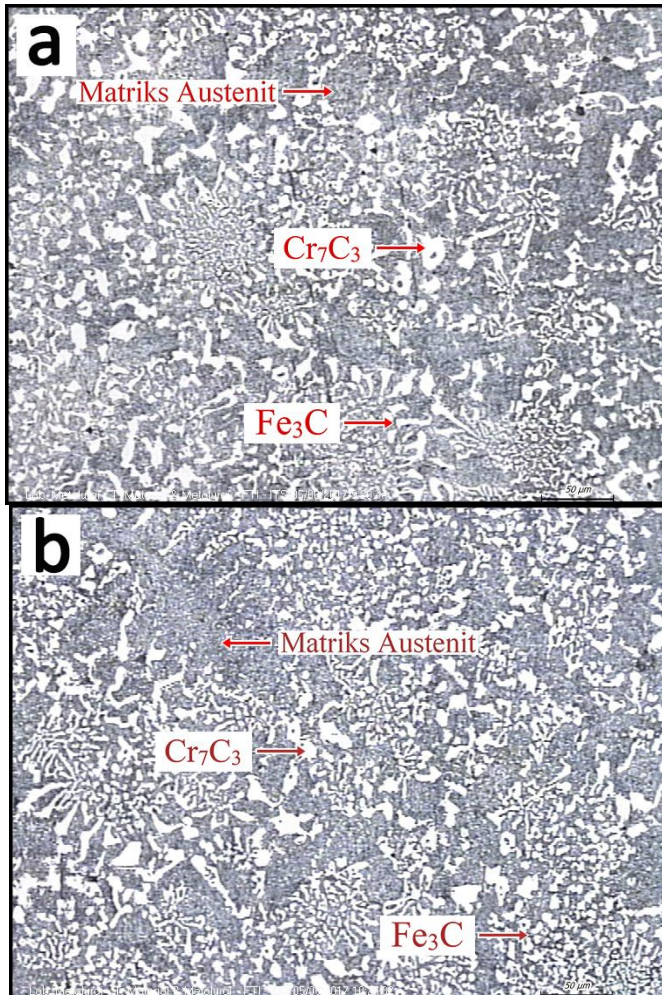
4.2.2. Hasil Pengujian Struktur Mikro Pada Material *Liner* Setelah Proses *Hardening*.

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari fasa yang terbentuk pada material *liner* setelah dilakukan proses *hardening* dengan variasi pada temperatur dan *quenching* dengan media pendingin oli dan udara serta mengetahui perbedaan yang terjadi dari struktur mikro material *new liner* sebelum dilakukan perlakuan panas dengan material *liner* yang telah mendapat perlakuan panas.

Pada gambar dibawah terdapat hasil struktur mikro dari material *liner* yang telah dilakukan proses *hardening*. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa fasa pada struktur mikro material *liner* yang telah dilakukan proses *hardening* adalah sama dengan material *new liner*, dengan austenite ditunjukkan dengan butiran

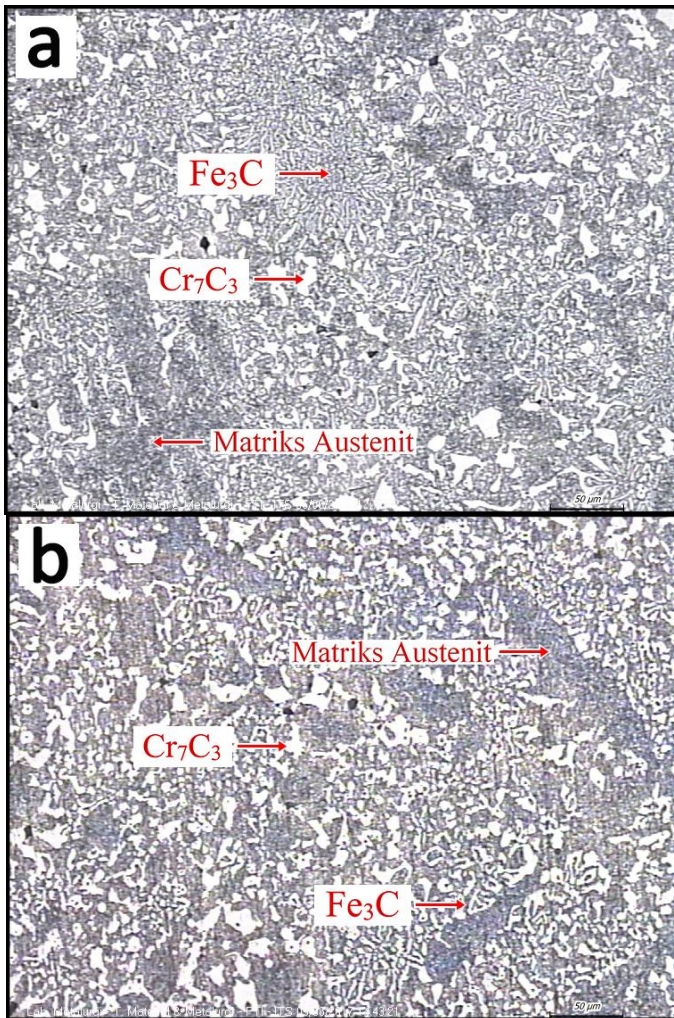


yang paling terang, Fe_3C yang berwarna lebih gelap, serta lamelar antara austenit, Fe_3C , dan Cr_7C_3 yang berwarna paling gelap.

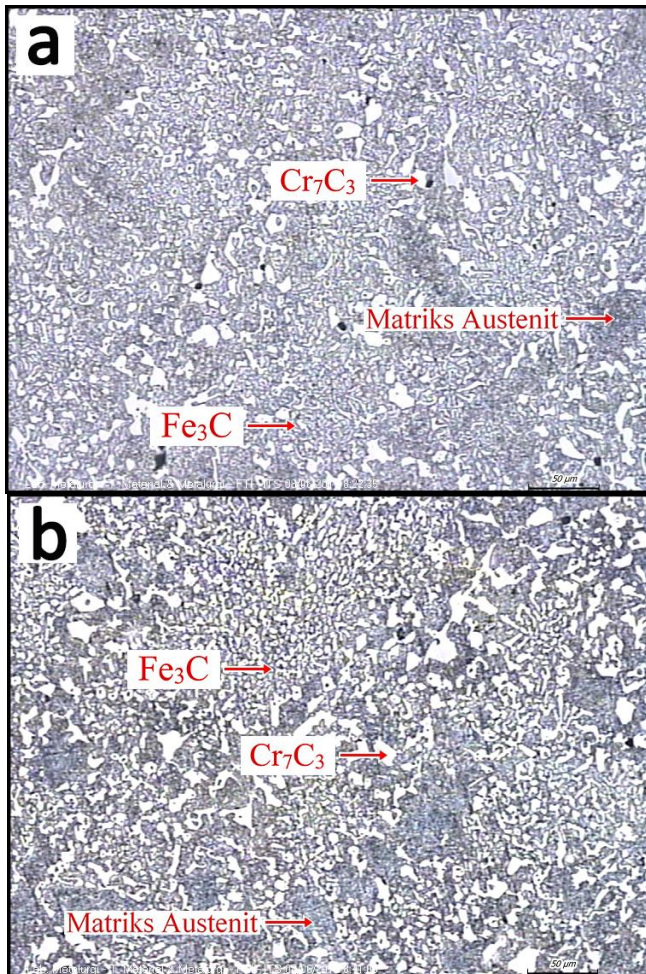


Gambar 4. 11 Struktur mikro material *liner* setelah proses *hardening* pada 800°C dengan *quenching* dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara. Perbesaran 200x

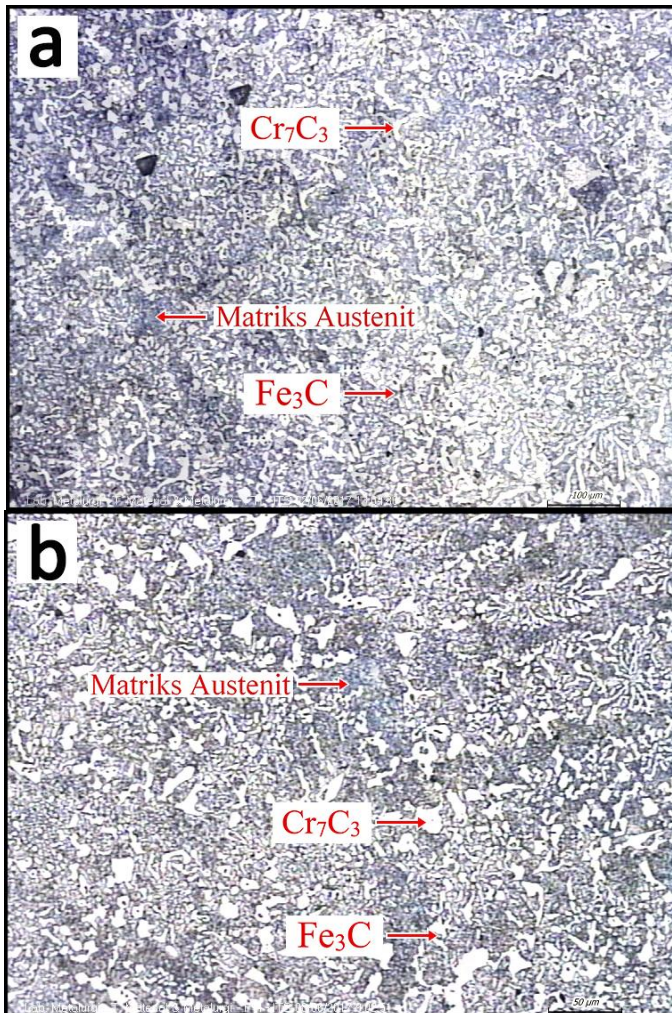
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 4. 12 Struktur mikro material *liner* setelah proses *hardening* pada 850°C dengan *quenching* dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara. Perbesaran 200x.



Gambar 4. 13 Struktur mikro material *liner* setelah proses *hardening* pada 900°C dengan *quenching* dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara. Perbesaran 200x



Gambar 4. 14 Struktur mikro material *liner* setelah proses *hardening* pada 950°C dengan *quenching* dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara. Perbesaran 200x



4.2.3. Hasil Pengujian Kekerasan Pada Material *Liner* Setelah Proses *Hardening*

Pengujian Kekerasan dilakukan pada permukaan spesimen tanpa perlakuan, pada setiap variasi temperatur *hardening*, dan pada setiap variasi media pendingin. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 5 titik, indentasi dilakukan secara *cross sectional* dengan beban sebesar 100 kgf. Hasil Pengujian kekerasan dapat dilihat pada tabel 4.6, serta grafik distribusi kekerasan yang ditunjukkan pada gambar 4.15.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Kekerasan pada material *liner* yang telah di *hardening*.

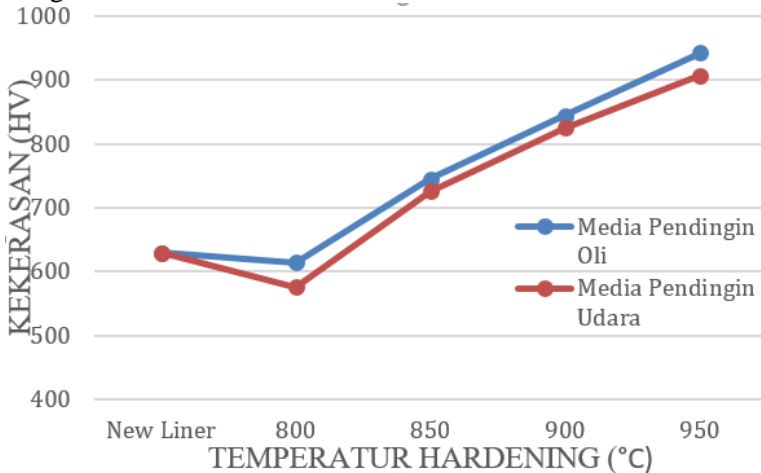
Nama Spesimen	Kekerasan (HV)
<i>Liner</i> H800-O	614
<i>Liner</i> H800-A	576
<i>Liner</i> H850-O	745
<i>Liner</i> H850-A	726
<i>Liner</i> H900-O	845
<i>Liner</i> H900-A	825
<i>Liner</i> H950-O	943
<i>Liner</i> H950-A	907

Dapat dilihat pada Tabel 4.6 bahwa setelah mengalami perlakuan panas proses *hardening* terjadi perubahan nilai kekerasan pada material *liner*. Material *liner* yang mengalami peningkatan nilai kekerasan yang paling tinggi ada pada material *liner* dengan temperatur *hardening* 950°C media pendingin oli dengan kekerasan sebesar 943 HV, yang dibandingkan dengan kondisi material *new liner* sebesar 630 HV. Untuk material *liner* dengan temperatur *hardening* 800°C media pendingin udara sedikit mengalami penurunan nilai kekerasan sebesar 614 HV, sedangkan material *liner* dengan temperatur *hardening* 800°C media pendingin oli mengalami penurunan nilai kekerasan yang cukup signifikan menjadi sebesar 574 HV. Pada material *liner* dengan temperatur *hardening* 850°C media pendingin oli dan udara mengalami peningkatan berturut-turut sebesar 745 HV dan 726

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



HV. Peningkatan kekerasan juga dialami pada material *liner* dengan temperatur *hardening* 900°C media pendingin oli dan udara, yaitu sebesar 845 HV dan 825 HV. Nilai kekerasan seluruhnya mengalami peningkatan kecuali material *liner* dengan temperatur *hardening* 800°C. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Grafik sifat kekerasan hasil proses hardening material *liner*

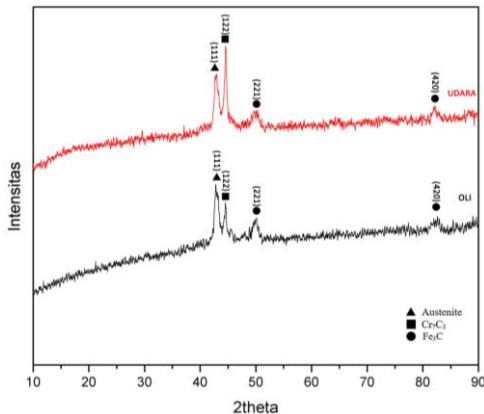
4.3. Hasil Proses Perlakuan Panas Material *Liner* Setelah Proses *Tempering*

Pada penelitian ini dilakukan upaya heat treatment untuk memperbaiki sifat kekerasasn dari komponen tersebut agar mendekati standar seharusnya. Heat treatment dilakukan pada temperatur 950°C, 900°C, 850°C, 800°C dengan waktu tahan 60 menit menggunakan media pendingin oli dan udara. Setelah di *hardening* dilakukan proses *tempering* pada temperatur 250°C dengan waktu tahan 120 menit menggunakan media pendingin udara. *Tempering* dilakukan untuk mengembalikan keuletan yang hilang akibat dari proses *hardening*.



4.3.1 Hasil Pengujian XRD pada Material *Liner* Setelah Proses *Tempering*

Pengujian X-Ray Diffraction dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material FTI-ITS. Bertujuan untuk mengidentifikasi fasa yang ada pada material *liner* setelah proses *hardening* dan dilanjutkan dengan proses *tempering*.

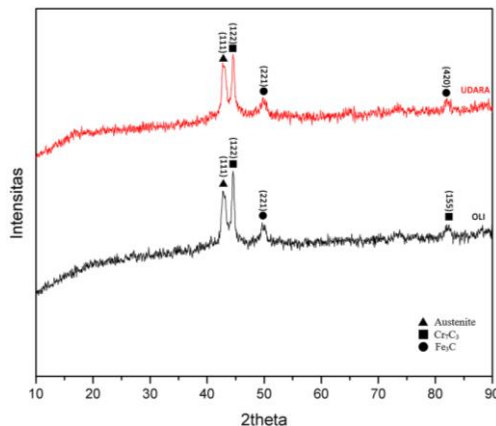


Gambar 4. 16 Grafik XRD material *liner* setelah proses *tempering* pada temperature 800°

Gambar 4.16 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 800°C dengan variasi media pendingin oli dan udara dan proses *tempering*. Pada temperature *hardening* 800°C dengan media pendingin oli disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 228,19 cts pada $2\theta = 42,7705^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5902^\circ$ dengan *peak height* sebesar 141,04 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-078-5298 yang muncul pada $2\theta = 49,9061^\circ$ dengan *peak height* 75,02 cts dan kartu PDF 01-077-9135 pada $2\theta = 86,06^\circ$. Lalu pada temperature *hardening* 800°C dengan media pendingin udara disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron*



(Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 206,42 cts pada $2\theta = 42,6800^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5391^\circ$ dengan *peak height* sebesar 321,51 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 yang muncul pada $2\theta = 49,69^\circ$ dan pada $2\theta = 82,0865^\circ$ dengan *peak height* 47,95 cts.

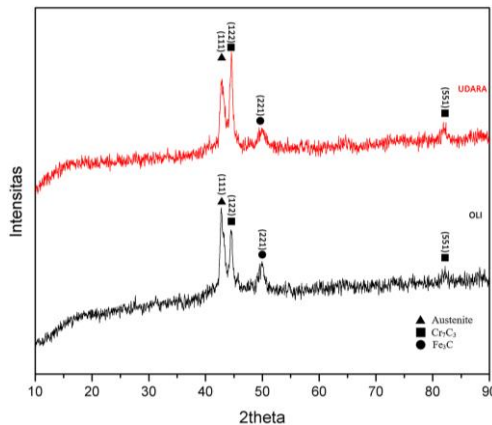


Gambar 4. 17 Grafik XRD material *liner* setelah proses *tempering* pada temperature 850°

Gambar 4.17 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 850°C dengan variasi media pendingin oli dan udara dan proses *tempering*. Pada temperature *hardening* 850°C dengan media pendingin oli disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 206,36 cts pada $2\theta = 42,7830^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,6202^\circ$ dengan *peak height* sebesar 265,39 cts dan kartu PDF 01-089-7244 terdapat pada $2\theta = 82,1684^\circ$ dengan *peak height* sebesar 35,71 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-078-5298 yang muncul pada $2\theta = 49,8824^\circ$ dengan *peak height* 60,63 cts. Lalu pada temperature *hardening* 850°C dengan media pendingin udara



disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 201,23 cts pada $2\theta = 42,7162^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5643^\circ$ dengan *peak height* sebesar 224,50 cts dan kartu PDF 01-089-7244 terdapat pada $2\theta = 82,0920^\circ$ dengan *peak height* sebesar 35,58 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-078-5298 yang muncul pada $2\theta = 49,89^\circ$ dengan *peak height* 31,18 cts.



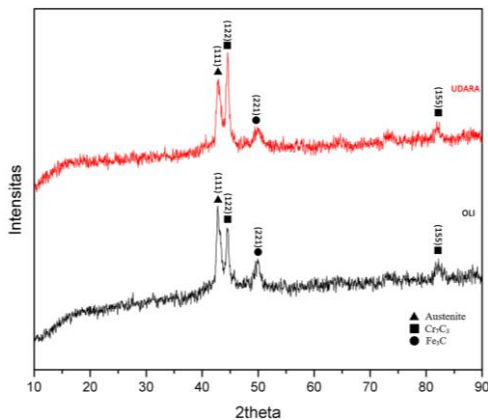
Gambar 4. 18 Grafik XRD material *liner* setelah proses *tempering* pada temperature 900°C

Gambar 4.18 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 900°C dengan variasi media pendingin oli dan udara dan proses *tempering*. Pada temperature *hardening* 900°C dengan media pendingin oli disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 266,75 cts pada $2\theta = 42,7725^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5315^\circ$ dengan *peak height* sebesar 186,82 cts dan dengan kartu PDF 00-036-0482 pada $2\theta = 82,037^\circ$. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-078-5298 yang muncul pada $2\theta = 50,0317^\circ$ dengan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



peak height 79,65 cts. Lalu pada temperature *hardening* 900°C dengan media pendingin udara disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 215,47 cts pada $2\theta = 42,7846^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5951^\circ$ dengan *peak height* sebesar 312,25 cts dan kartu PDF 01-077-9135 terdapat pada $2\theta = 82,0348^\circ$ dengan *peak height* sebesar 41,55 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-078-5298 terdapat pada $2\theta = 49,96^\circ$.



Gambar 4. 19 Grafik XRD material *liner* setelah proses *tempering* pada temperature 950°C

Gambar 4.19 menunjukkan grafik XRD material *liner* setelah proses *hardening* pada temperature 950°C dengan variasi media pendingin oli dan udara dan proses *tempering*. Pada temperature *hardening* 950°C dengan media pendingin oli disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 00-052-0513 sebesar 215,90 cts pada $2\theta = 42,7693^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5449^\circ$ dengan *peak height* sebesar 385,60 cts dan kartu PDF 01-089-7244 terdapat pada $2\theta = 82,1414^\circ$ dengan *peak height* sebesar 35,71 cts. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 yang



muncul pada $2\theta = 49,8227^\circ$ dengan *peak height* 42,92cts. Lalu pada temperature *hardening* 950°C dengan media pendingin udara disajikan hasil XRD yaitu senyawa *austenite/iron* (Fe) dengan kartu PDF 01-071,4407 sebesar 198,16 cts pada $2\theta = 42,8085^\circ$. Kemudian *Carbon Kromium* (Cr_7C_3) dengan kartu PDF 00-006-0683 terdapat pada $2\theta = 44,5405^\circ$ dengan *peak height* sebesar 201,04 cts dan kartu PDF 01-089-7244 pada $2\theta = 82,25^\circ$. Dan yang terakhir adalah senyawa *Iron Carbide* (Fe_3C) dengan kartu PDF 01-077-9135 terdapat pada $2\theta = 49,7368^\circ$ dengan *peak height* sebesar 70,21 cts.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kekerasan pada material *liner* yang telah di *hardening*.

Kode Spesimen	2theta	Fasa	ICDD Card	Peak Height (cts)
H800-O-T	42.7705	Austenite	00-052-0513	228.19
	44.5909	Cr_7C_3	00-006-0683	141.04
	49.9061	Fe_3C	01-078-5298	75.02
	82.06	Fe_3C	01-077-9135	55.56
H800-A-T	42.68	Austenite	00-052-0513	206.42
	44.5391	Cr_7C_3	00-006-0683	321.51
	49.69	Fe_3C	01-077-9135	45.65
	82.0865	Fe_3C	01-077-9135	47.95
H850-O-T	42.783	Austenite	00-052-0513	206.36
	44.3202	Cr_7C_3	00-006-0683	265.39
	49.8824	Fe_3C	01-078-5298	60.63
	82.1684	Fe_3C	01-089-7244	35.71
H850-A-T	42.7126	Austenite	00-052-0513	201.23
	44.5643	Cr_7C_3	00-006-0683	224.5
	49.89	Fe_3C	01-078-5298	40.51
	82.092	Cr_7C_3	01-089-7244	35.58
H900-O-T	42.7725	Austenite	00-052-0513	266.75

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



	44.5315	Cr ₇ C ₃	00-006-0683	186.75
	50.0317	Fe ₃ C	01-078-5298	79.65
	82.037	Cr ₇ C ₃	00-036-0482	23.15
H900-A-T	42.7846	Cr ₇ C ₃	00-052-0513	215.47
	44.5351	Cr ₇ C ₃	00-006-0683	312.25
	49.96	Fe ₃ C	01-078-5298	55.62
	82.0348	Cr ₇ C ₃	00-036-0482	41.55
H950-O-T	42.7693	Austenite	00-052-0513	215.9
	44.5449	Cr ₇ C ₃	00-006-0683	385.6
	49.8227	Fe ₃ C	01-077-9135	51.14
	82.1414	Cr ₇ C ₃	01-089-7244	42.92
H950-A-T	42.8285	Austenite	01-071-4407	198.16
	44.5405	Cr ₇ C ₃	00-006-0683	201.04
	49.7368	Fe ₃ C	01-077-9135	70.21
	82.25	Cr ₇ C ₃	01-089-7244	40.63

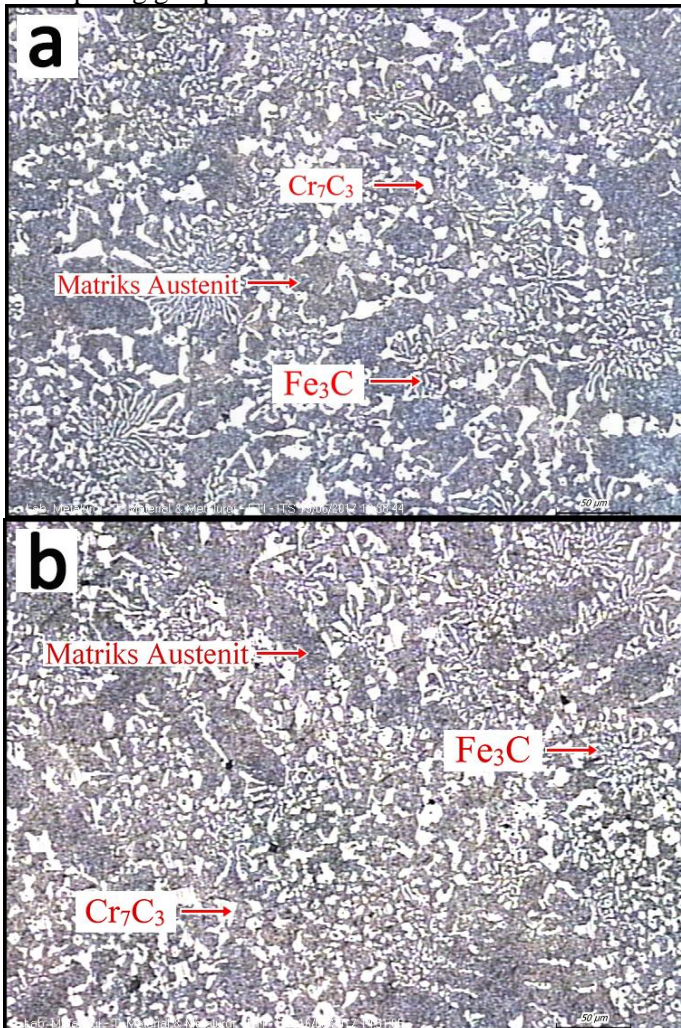
4.3.2. Hasil Pengujian Struktur Mikro Pada Material *Liner* Setelah Proses *Tempering*

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari fasa yang terbentuk pada material *liner* setelah dilakukan proses *hardening* dengan variasi pada temperatur dan *quenching* dengan media pendingin oli dan udara dilanjutkan dengan proses *tempering* serta mengetahui perbedaan yang terjadi dari struktur mikro material *new liner* sebelum dilakukan perlakuan panas dengan material *liner* yang telah mendapat perlakuan panas.

Pada gambar dibawah terdapat hasil struktur mikro dari material *liner* yang telah dilakukan proses *hardening* dan *tempering*. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa fasa pada struktur mikro material *liner* yang telah dilakukan proses *hardening* adalah sama dengan material *new liner*, dengan matriks austenit yang berupa dendrit yang berwarna paling gelap, kemudian karbida eutektik, Cr₇C₃ yang berwarna paling terang,

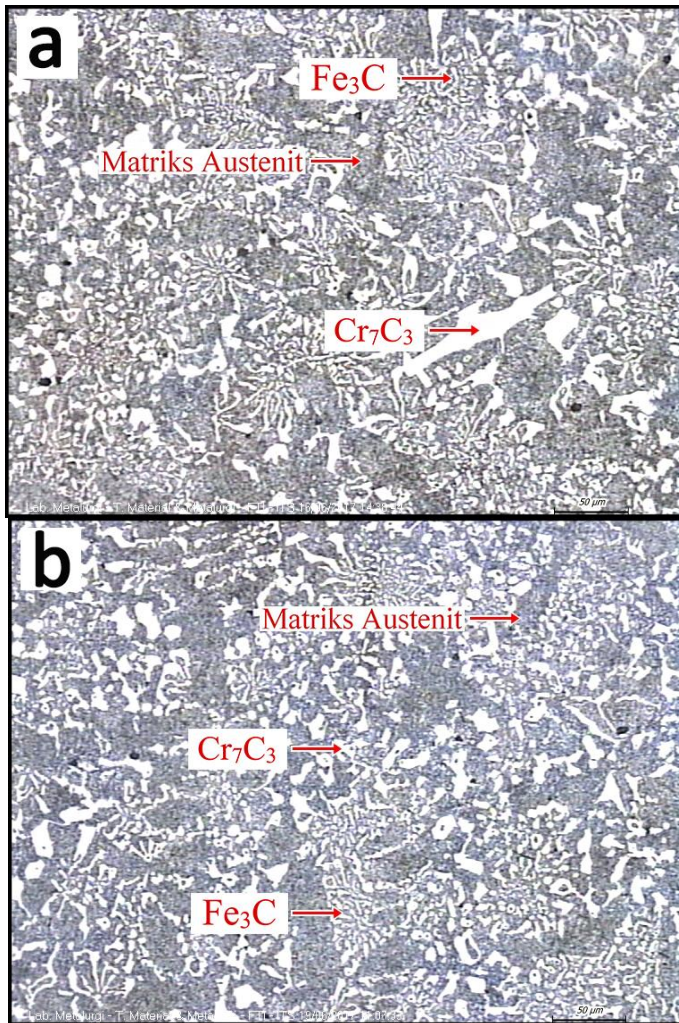


serta lamelar antara austenit, karbida Fe_3C , dan karbida Cr_7C_3 yang berwarna paling gelap.

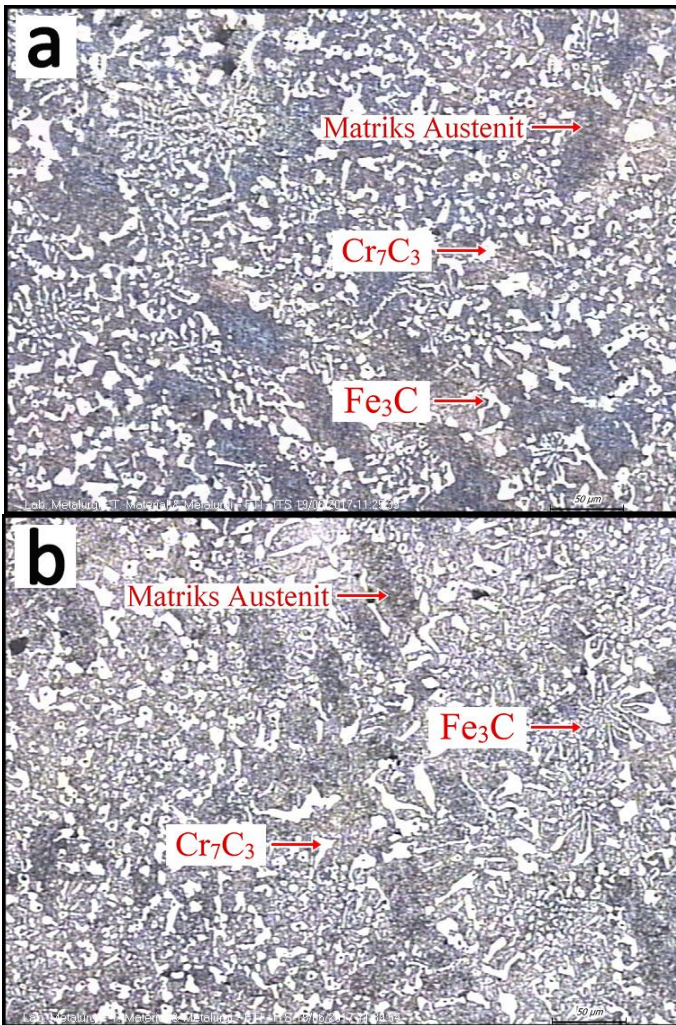


Gambar 4. 20 Struktur mikro material *liner* setelah proses *hardening* pada 800°C *quenching* dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara dan dilakukan proses *tempering*. Perbesaran 200x

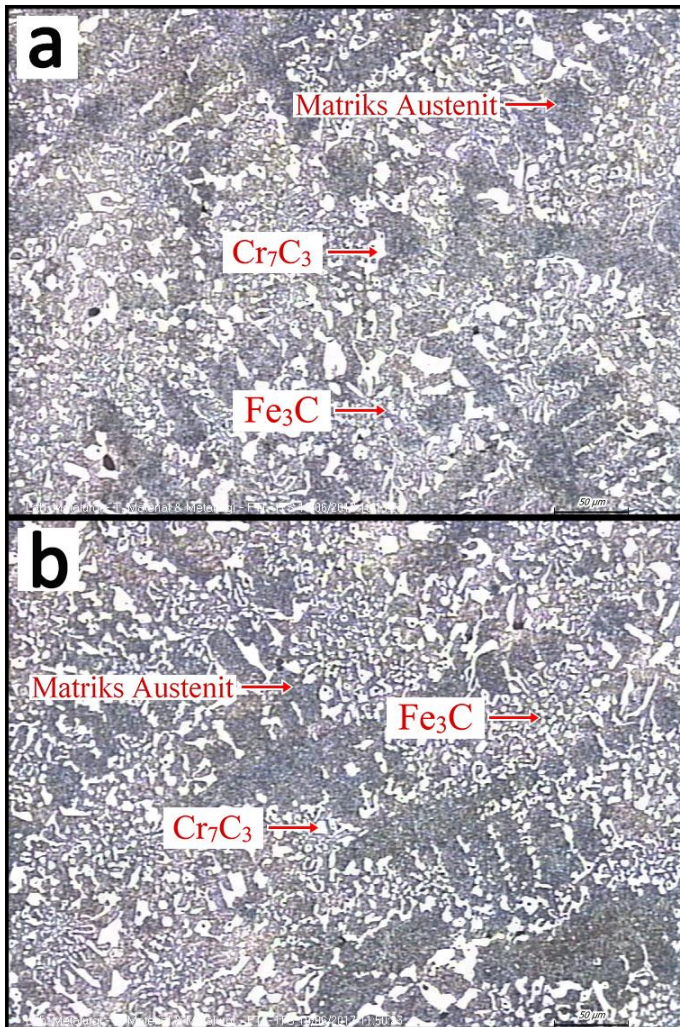
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 4. 21 Struktur mikro material *liner* setelah proses *hardening* pada 850°C *quenching* dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara dan dilakukan proses *tempering*. Perbesaran 200x.



Gambar 4. 22 Struktur mikro material *liner* setelah proses *hardening* pada 900°C *quenching* dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara dan dilakukan proses *tempering*. Perbesaran 200x



Gambar 4. 23 Struktur mikro material *liner* setelah proses *hardening* pada 950°C *quenching* dengan media pendingin (a) oli dan (b) udara dan dilakukan proses *tempering*. Perbesaran 200x



4.3.3. Hasil Pengujian Kekerasan Pada Material *Liner* Setelah Proses *Tempering*

Pengujian Kekerasan dilakukan pada setiap variasi temperatur *hardening*, dan pada variasi media pendingin. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 3 titik, indentasi dilakukan secara *cross sectional* dengan beban sebesar 100 kgf.

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Kekerasan pada material *liner* yang telah di *hardening* dan *tempering*.

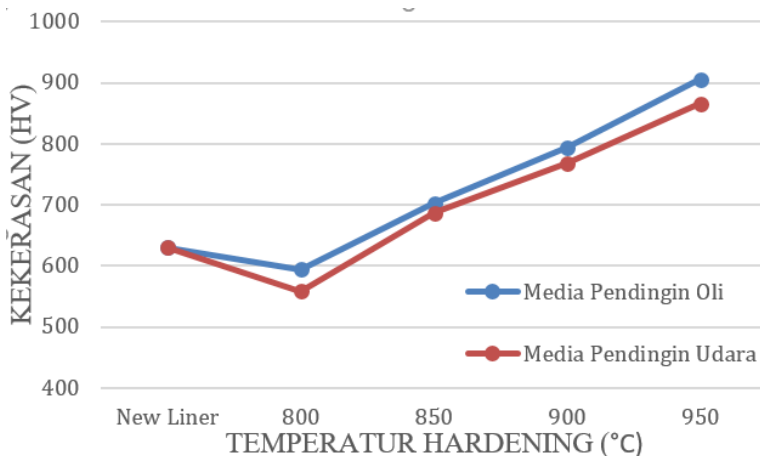
Nama Spesimen	Kekerasan (HV)
<i>Liner</i> H800-O-T	594
<i>Liner</i> H800-A-T	558
<i>Liner</i> H850-O-T	703
<i>Liner</i> H850-A-T	687
<i>Liner</i> H900-O-T	794
<i>Liner</i> H900-A-T	769
<i>Liner</i> H950-O-T	906
<i>Liner</i> H950-A-T	866

Dapat dilihat pada Tabel 4.8 bahwa setelah mengalami perlakuan panas proses *hardening* dan *tempering* terjadi perubahan nilai kekerasan pada material *liner*. Seluruh material *liner* memiliki variasi temperatur *hardening* dan *quenching* dengan media pendingin oli dan udara kemudian dilakukan proses *tempering* dengan parameter yang sama. Kemudian material *liner* yang mengalami peningkatan nilai kekerasan yang paling tinggi ada pada material *liner* dengan temperatur *hardening* 950°C media pendingin oli dengan kekerasan sebesar 906 HV, yang dibandingkan dengan kondisi material *new liner* sebesar 630 HV. Untuk material *liner* dengan temperatur *hardening* 800°C media pendingin udara sedikit mengalami penurunan nilai kekerasan sebesar 594 HV, sedangkan material *liner* dengan temperatur *hardening* 800°C media pendingin oli mengalami penurunan nilai kekerasan yang cukup signifikan menjadi sebesar 558 HV. Pada material *liner* dengan temperatur *hardening* 850°C media

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



pendingin oli dan udara mengalami peningkatan berturut-turut sebesar 703 HV dan 687 HV. Peningkatan kekerasan juga dialami pada material *liner* dengan temperatur *hardening* 900°C media pendingin oli dan udara, yaitu sebesar 794 HV dan 769 HV. Nilai kekerasan seluruhnya mengalami peningkatan kecuali material *liner* dengan temperatur *hardening* 800°C. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.24.



Gambar 4. 24 Grafik sifat kekerasan hasil proses *hardening* dan tempering material *liner*

4.3.4 Hasil Pengujian Ketahanan Aus pada Material *Liner* Setelah Proses *Tempering*

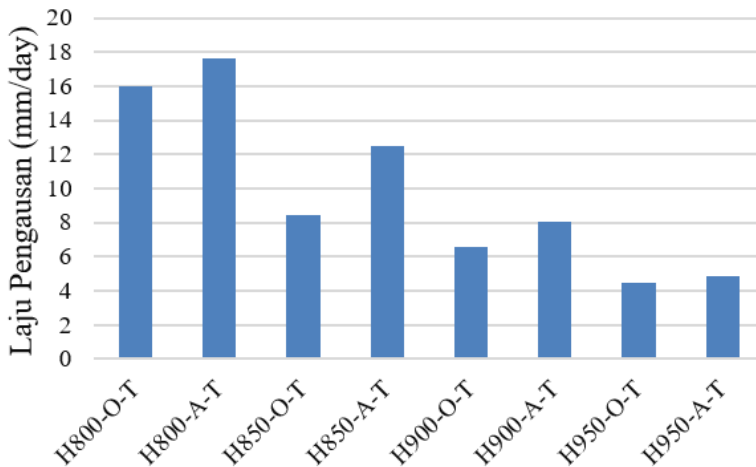
Pengujian ketahanan aus dilakukan pada permukaan spesimen material *liner* pada setiap variasi temperatur *hardening*, dan media pendingin. Data yang diperoleh berupa selisih massa antara material *liner* sebelum dan sesudah dilakukan pengujian. Setelah nilai *mass loss* didapatkan, selanjutnya ditentukan volume loss, yang mana lebih relevan untuk dibandingkan dengan menggunakan densitas dari material (7.7 g/cm^3) dan dibuat dalam laju pengausan yang menunjukkan pengurangan ketebalan dalam



millimeter per hari. Data hasil pengujian ketahanan aus disajikan pada tabel 4.9

Tabel 4. 9 Rata-rata hasil pengujian ketahanan aus pada material *liner* yang telah di *hardening* dan *tempering*.

Nama Spesimen	Laju Pengausan (mm/day)	Nilai Kekerasan (HV)
<i>Liner</i> H800-O-T	15.97	594
<i>Liner</i> H800-A-T	17.63	558
<i>Liner</i> H850-O-T	8.40	703
<i>Liner</i> H850-A-T	12.46	687
<i>Liner</i> H900-O-T	6.58	794
<i>Liner</i> H900-A-T	8.03	769
<i>Liner</i> H950-O-T	4.50	906
<i>Liner</i> H950-A-T	4.84	866



Gambar 4. 25 Grafik laju keausan material *liner*.

Pada tabel 4.9 menunjukkan laju keausan pada material *liner* dengan berkurang dengan meningkatnya temperatur *hardening*. Kemudian pada variasi media pendingin, penggunaan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



media pendingin oli didapatkan laju keausan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan penggunaan media pendingin udara. Kemudian material *liner* dengan laju pendinginan paling rendah terdapat pada material *liner* dengan temperatur *hardening* 950°C media pendingin oli dengan laju keausan sebesar 4,50 mm/hari. Sedangkan material *liner* dengan laju keausan tertinggi ada pada material *liner* dengan temperatur *hardening* 800°C media pendingin udara dengan laju keausan sebesar 17,60 mm/hari. Untuk ilustrasi selisih massa dapat dilihat pada gambar 4.25 .

4.4. Pembahasan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan selama penelitian berlangsung berikut adalah beberapa faktor penyebab kegagalan, yaitu terdapat kesalahan dalam pemilihan material yang digunakan untuk *chute inlet feed liner*. Material standar yang digunakan seharusnya memiliki komposisi kimia yang sesuai dalam rentang material *Ni-Hard*. Sedangkan material *chute inlet feed liner* yang digunakan oleh PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. adalah ASTM A532 Class II Type A. Nilai kekerasan yang dimiliki material *Ni-Hard* lebih besar dengan rentang 630 – 860 HV dibandingkan dengan material *liner* yang terpasang dengan nilai kekerasan sebesar 630 HV. Jika dilihat dari segi komposisi, beberapa unsur memiliki nilai yang berbeda, yaitu nilai kromium yang berbeda jauh dengan standar yang memiliki nilai maksimum sebesar 7% sedangkan nilai dari material *liner* yang terpasang sebesar 24,5%. Cromium merupakan unsur pembentuk karbida dan penstabil ferrit yang baik, dengan adanya cromium dapat menaikkan temperatur austenisasi karena kromium adalah unsur pembentuk karbida dan penstabil ferrit. Ditinjau dari komposisi kromium tersebut untuk perlakuan panas dibutuhkan temperatur austenisasi lebih tinggi dari temperatur A1 dan media pendinginnya cukup menggunakan oli atau udara untuk menghasilkan kekerasan maksimal. (Avner, 1974)

Hasil pengamatan secara makro, menunjukkan bahwa terjadi pengurangan ketebalan pada sebagian material *liner*, serta



terlihat bahwa pada tempat jatuhnya material terdapat pola goresan memanjang searah dengan arah jatuhnya material. Hal ini dapat terjadi karena terdapat pasir silika pada *raw material* yang masuk ke dalam sistem mengenai *chute inlet feed liner*. Apabila material pada permukaan berkurang akibat kontak dengan material yang keras, maka akan terjadi *abrasive wear* (Ratia, 2015). Saat partikel tajam menggores permukaan material lain, akan menimbulkan goresan dan membuat alur yang semakin besar, dan bila penggoresan dilanjutkan material tersebut akan mengalami penipisan yang diakibatkan oleh kelelahan dari material tersebut. (Gagg, 2006). Pasir silika yang masuk ke dalam sistem memiliki kekerasan sebesar 1430 HV (Wiengmoon, 2011) yang berbeda jauh dengan material *liner* baru yang memiliki kekerasan sebesar 630 HV.

Hasil dari pengujian struktur mikro dari material *liner* yang digunakan di PT. Semen Indonesia menunjukkan bahwa material ini termasuk dalam ASTM A532 Class III Type A yang terdiri dari matriks dentrit austenit, karbida Fe_3C , dan karbida Cr_7C_3 . Hal ini bersesuaian dengan hasil pengujian XRD yang menunjukkan munculnya peak dari ketiga senyawa tersebut. Hal ini dibuktikan dengan pendapat Cobos, 2015, bahwa proses solidifikasi dari paduan hipoeutektik, diawali dengan pembentukan dendrit dari matriks (austenite) pada rentang temperature solidifikasi tertentu hingga mencapai temperature eutektik, kemudian dilanjutkan dengan pembentukan struktur eutektik dengan reaksi $\text{L} \rightarrow \gamma + \text{M}_7\text{C}_3$. Walaupun sementit akan hilang dikarenakan tingginya kadar kromium pada *high kromium white cast iron*, sejumlah sementit masih dapat terbentuk. Kandungan kromium yang tinggi pada material ini menyebabkan karbida Fe_3C pada *white cast iron* menjadi tidak stabil, dan keberadaannya digantikan oleh Cr_7C_3 (karbida primer) yang lebih stabil.

Setelah material *liner* diberi perlakuan panas dengan variasi temperatur austenisasi dan di *quench* dengan media pendingin yang berbeda-beda, diperoleh struktur mikro berupa fasa austenit, Fe_3C , dan Cr_7C_3 yang dikonfirmasi dalam setiap peak

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



XRD dalam masing-masing spesimen. Selanjutnya, untuk material dengan nilai kekerasan paling tinggi adalah spesimen H950-O-T dengan nilai kekerasan sebesar 906 HV setelah dilakukan proses hardening. Dari hasil pengamatan struktur mikro dan pengujian XRD tidak ditemukan adanya fasa martensit setelah proses *quenching*. Unsur paduan yang terdapat pada material *high chromium white cast iron* akan menurunkan temperatur awal pembentukan martensit (Ms) dan temperatur akhir pembentukan martensit (Mf) (Avner, 1974). Banyaknya unsur paduan pada material *liner* memungkinkan kondisi temperatur awal terbentuknya martensit berada di bawah temperatur kamar. Peningkatan kekerasan hal ini disebabkan tingginya unsur kromium dalam material. Nilai kekerasan dapat dicapai berkaitan dengan proses austenisasi. Austenisasi merupakan salah satu mekanisme pembentukan karbida pada material *high kromium white cast iron*. Ketika proses austenisasi berlangsung, unsur kromium dalam matriks akan bereaksi dengan karbon membentuk senyawa karbida dalam matriks sehingga kandungan karbon dalam matriks akan berkurang. Semakin tinggi temperatur austenisasi, akan menyebabkan karbon dalam austenit cenderung untuk berikatan dengan kromium. Peran unsur khrom pada material *high kromium white cast iron* adalah untuk membentuk karbida yang stabil dan keras, yaitu M_7C_3 atau (Fe,Cr) . Karbida ini memiliki struktur kristal berupa *hexagonal closed packed*, dengan bentuk struktur mikro berupa tiga dimensi *hexagonal rod*. Hal ini sejalan dengan pengujian struktur mikro yang dilakukan, bahwa dengan ukuran butir yang semakin kecil menyebabkan kenaikan kekerasan pada material *liner*, dibuktikan pada gambar 4.11 dan 4.14 bahwa dendrit austenit yang terdapat pada spesimen H950-O lebih kecil dibandingkan dengan spesimen H800-A dan dapat dilihat bahwa persebaran dari karbida primer Cr_7C_3 (berbentuk bulat kecil) menjadi semakin luas. Peningkatan kekerasan yang terjadi pada spesimen H950-O dikarenakan unsur kromium yang tinggi pada material ini menyebabkan karbon yang terdapat pada matriks austenit cenderung berikatan dengan kromium untuk membentuk



karbida Cr_7C_3 . Dimana nilai kekerasan dari karbida ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan karbida Fe_3C pada *white cast iron*. (Nurjaman, 2012) Namun, apabila melihat hasil dari spesimen H800-O dan H800-A mengalami penurunan kekerasan, hal ini disebabkan oleh rentang terbentuknya karbida kromium sekunder berada pada proses austenisasi dengan temperature antara 850°C sampai dengan 1000°C dengan kadar kromium minimal 15%. (Wiengmoon, 2011) Sedangkan, pada temperatur 800°C sudah masuk dalam temperatur austenisasi sehingga menyebabkan ukuran matriks austenite membesar, namun karbon yang larut dalam dendrit matriks austenite belum berikatan dengan kromium. Ukuran butir yang semakin besar menyebabkan penurunan tegangan dalam butir sehingga kekerasan yang di dapatkan menurun.

Kemudian dari pengujian kekerasan dengan temperatur 950°C dengan media pendingin yang berbeda terdapat sedikit perbedaan, yaitu dengan media pendingin oli sebesar 943 HV dan media pendingin udara sebesar 907 HV. Dari keadaan struktur mikro, menunjukkan bahwa dengan media pendingin udara menghasilkan butiran yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan media pendingin udara. Untuk persebaran butir dari karbida krom, media pendingin oli cenderung lebih merata sehingga dendrit dari matriks austenite sendiri memiliki ukuran yang lebih kecil. Hal ini menyebabkan dengan media pendingin oli memiliki kekerasan yang lebih dibandingkan dengan media pendingin udara. Hal ini juga dipengaruhi oleh *severity of quench* dari atau koefisien kekuatan pendinginan, ditandai dengan, H. media pendingin oli tanpa adanya agitasi memiliki nilai koefisien kekuatan pendinginan yang lebih besar daripada media pendingin udara, hal ini menyebabkan laju pendinginan dengan media pendingin oli menjadi lebih besar (Avner, 1974). Untuk mencapai struktur martensit, diperlukan laju pendinginan yang semakin cepat. Martensit memiliki struktur yang pipih dan tegang mengakibatkan naiknya kekerasan, struktur FCC dari austenit tidak sempat untuk berubah menjadi BCC sehingga menyebabkan adanya atom yang

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



terperangkap, namun dalam penelitian ini belum ditemukan adanya martensit dalam struktur mikro. Kenaikan kekerasan dikarenakan adanya unsur karbida krom. Dari media pendingin yang berbeda, ditemukan bahwa dengan media pendingin oli memiliki ukuran butir yang lebih kecil sehingga kekerasannya lebih tinggi.

Hasil dari pengujian ketahanan aus, menunjukkan hasil yang linier dengan hasil pengujian kekerasan. Bahwa dengan peningkatan kekerasan akan meningkatkan sifat ketahanan aus dari material tersebut. Dengan spesimen H950-O-T dengan kekerasan sebesar 903 HV, memiliki laju pengausan sebesar 4,50 mm/hari. Seluruh hasil menunjukkan data yang linier antara pengujian kekerasan dengan pengujian ketahanan aus. Menurut Ratia, 2015, pada *abrasive wear*, kekerasan adalah sifat yang paling penting untuk meningkatkan kemampuan suatu baja dalam ketahanan aus dikarenakan goresan. Makin keras material tersebut, makin sulit media *abrasive* untuk melakukan penetrasi dan menggores material tersebut. Berhubungan dengan mikrostruktur yang mana bila baja tersebut memiliki ukuran butir yang semakin kecil akan memiliki ketahanan aus yang lebih baik. Mekanisme pengerasan yang terjadi disebabkan oleh unsur karbida krom. Saat proses pemanasan terjadi, unsur karbon dalam dendrit matriks austenite cenderung berikatan dengan kromium menghasilkan karbida sekunder (Cr_7C_3). Keberadaan karbida sekunder dalam matriks pada material *high chromium white cast iron* dapat memberikan peningkatan yang signifikan terhadap nilai kekerasan dan ketahanan gesek. (Nurjaman, 2012).



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan ada beberapa kesimpulan :

1. Faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan pada material *chute inlet feed liner* pada *vertical roller mill* yaitu komposisi material yang tidak sesuai, dengan standar dan mengakibatkan terjadinya *abrasive wear* yang berlebihan, sehingga material tidak mencapai *lifetime* sesuai dengan harapan.
2. Proses perlakuan panas yang sesuai pada material *chute inlet feed liner* adalah dengan cara pemanasan pada temperatur austenisasi 950°C menggunakan media pendingin berupa udara.

5.2 Saran

1. Melakukan pengujian perlakuan panas dengan pendinginan hingga dibawah temperature kamar (*subzero treatment*).
2. Melakukan pengujian perlakuan panas dengan variasi temperature austenisasi yang lebih beragam.
3. Menggunakan produk lain yang sesuai dengan standar atau lebih baik untuk *chute inlet feed liner* dan yang lebih murah serta efisien dalam penggunaannya.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- , 1991. *ASM Handbook Vol. 1 Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloy*. USA: ASM International.
- , 1991. *ASM Handbook Vol. 4 Heat Treating*. USA: ASM International.
- , 1991. *ASM Handbook Vol. 11 Failure Analysis*. USA: ASM International.
- , 2003. *ASTM A532 Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons*. USA: ASM International.
- , 2003. *ASTM G99 Standard Test Method for Wear testing with Pin-on-Disk Apparatus*. USA: ASM International.
- Askeland, Donald R. 2010. *The Science and Engineering of Materials*. USA: Congage Learning
- Astuti, Widi. 2015. *Karakteristik Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Putih Paduan Krom Tinggi Hasil Thermal Hardening untuk Aplikasi Grinding Ball*. *Majalah Metalurgi* V: 177-184
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction To Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Bedolla-Jacuinde, A., Hernandez,. Dan Bejar-Gomez, L. 2005. *SEM Study on the M7C3 Carbide Nucleation during Eutectic Solidification of High Chromium White Irons*. *Z Metalkd*
- Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Cobos, et al. 2015. *Improvement of Abrasive Wear Resistance of The High Chromium Cast Iron ASTM A-532 through Thermal Treatment Cycles*. *Facultad de Ingenieria* Vol.25: 93-103
- Dieter, George E. 1987. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga.
- FLSmidth. 2016. *about us : FLSmidth*. Februari 10. [http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%](http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20about%20us.pdf)

- 20for%20raw%20grinding%20and%20silos/ATOX_Raw_Mill.ashx.
- Gagg, Colin R, Peter R. Lewis. 2007. *Wear as a Product Failure Mechanism – Overview and Case Studies*. Engineering Failure Analysis 14: 1618-1640.
- Hanidya, Inggil. 2016. *Seksi Pemeliharaan Mesin Packer dan Pelabuhan Pabrik Tuban*. Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
- Hinckley, et al. 2008. *SEM Investigation of Heat Treated High Chromium Cast Irons*. Materials Forum Vol. 32.
- Kopycinski, et, al. 2014. *Analysis of The High Chromium Cast Iron Microstructure after The Heat Treatment*. AGH University of Science and Technology.
- Li, et al. 2009. *Phase Diagram Calculation of High Chromium Cast Irons and Influence of Its Chemical Composition*. Materials & Design 30: 340–345
- Murtiono, Arief. 2012. *Pengaruh Quenching dan Tempering terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik serta Struktur Mikro Baja Karbon Sedang Untuk Mata Pisau Pemanen Sawit*. Sumatera: Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.
- Nurjaman, Fajar. 2012. *Pembuatan Grinding Ball dari Material White Cast Iron dengan Penambahan Chromium, Molybdenum, Vanadium, dan Boron sebagai Unsur Pduan Pembentuk Karbida*. Depok: Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- Ortega-Cubillos, Patricia. 2015. *Wear Resistance of High Chromium White Cast Iron for Coal Grinding Rolls*. Brasil: Universidad de Antioquia.
- Powell, G. L. F., Brown, I. H., dan Nelson, G. D. 2003. *Tough Hypereutectic High Chromium White Iron – A Double in-situ Fibrous Composite*.

- Ratia, V. 2015. *Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions*. Tampere: Tampere University of Technology.
- Rohrig, K. 1996. *Ni-Hard Material Data and Applications*. Canada: Nickel Development Institute.
- Wiengmoon, A. 2011. *Carbides in High Chromium Cast Irons*. Naresuan University.
- Yuswono. 2004. *Pembuatan Perunggu (Paduan Cu-10%Sn) Berpori untuk Komponen Bantalan Pelumas Sendiri*. Serpong: Prosiding Pertemuan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A. Analisis OES (Optical Emission Spectroscopy) Komposisi Kimia

	PT. LOGAMINDO SARIMULIA IRON AND STEEL FOUNDRY Telp : (62-31) 8544549 - 43 Fax : (62-31) 8544542 E-mail : Lisafoundry@gmail.com www.logamindosarimulia.com	
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------

Method: Fe-01-F
 Comment: Orientation
 Sample Name: Fe+Cr
 Quality:

4/4/2017 10:44:32 AM

Element concentration


	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	2.77	0.805	0.573	0.0373	0.0278	24.47	0.637	0.273
2	2.79	0.800	0.575	0.0379	0.0253	24.48	0.639	0.271
3	2.78	0.800	0.576	0.0371	0.0242	24.56	0.635	0.274
< x > (3)	2.78	0.802	0.574	0.0374	0.0257	24.50	0.637	0.272
sd	0.0087	0.0031	0.0015	0.00039	0.0018	0.0475	0.0021	0.0013
rd	0.3	0.4	0.3	1.0	7.2	0.2	0.3	0.5

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0512	0.0316	0.0479	0.0520	0.0168	0.0764	< 0.0100	< 0.0040
2	0.0529	0.0317	0.0479	0.0521	0.0185	0.0764	< 0.0100	< 0.0040
3	0.0529	0.0318	0.0481	0.0519	0.0189	0.0769	< 0.0100	< 0.0040
< x > (3)	0.0523	0.0317	0.0479	0.0520	0.0167	0.0763	< 0.0100	< 0.0040
sd	0.00099	0.00007	0.00011	0.00011	0.00023	0.00027	0.00000	0.00000
rd	1.9	0.2	0.2	0.2	1.4	0.4	0.0	0.0

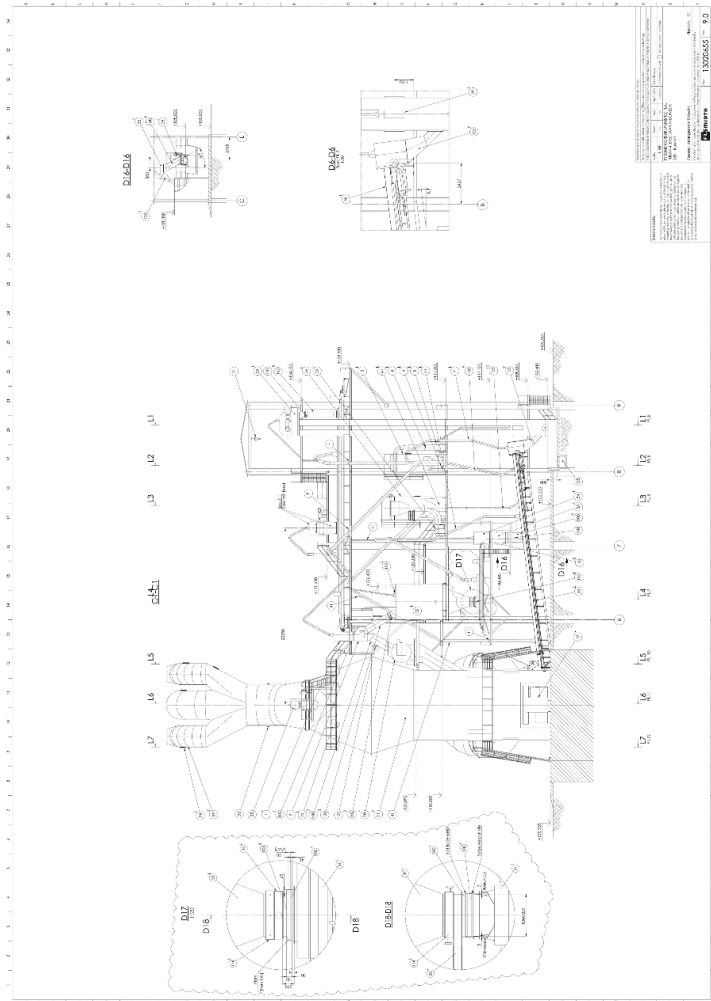
	Sn	Mg	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0075	0.0179	0.0079	< 0.0015	< 0.0050	0.0011	0.0223	< 0.0020
2	0.0077	0.0179	0.0084	< 0.0015	< 0.0050	0.0012	0.0228	< 0.0020
3	0.0079	0.0179	0.0094	< 0.0015	< 0.0050	0.0011	0.0224	< 0.0020
< x > (3)	0.0077	0.0179	0.0086	< 0.0015	< 0.0050	0.0011	0.0225	< 0.0020
sd	0.00021	0.00003	0.00077	0.00000	0.00000	0.00006	0.00027	0.00000
rd	2.8	0.2	9.0	0.0	0.0	5.3	1.2	0.0

	Te	B	Zn	La	Fe		
	%	%	%	%	%		
1	0.0037	0.0013	> 0.0540	0.0090	70.0		
2	0.0030	0.0012	> 0.0540	0.0090	70.0		
3	0.0038	0.0012	> 0.0540	0.0086	69.9		
< x > (3)	0.0035	0.0012	> 0.0540	0.0089	69.9		
sd	0.00043	0.00003	0.00000	0.00020	0.0510		
rd	12.4	2.1	0.0	2.3	0.1		

Tanda tangan



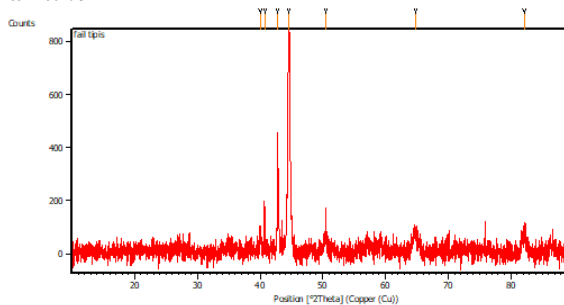
B. Gambar Desain
1. Desain *Vertical Roller Mill*



Hasil XRD



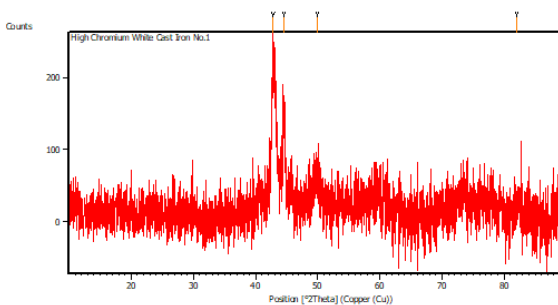
1. Fail liner



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
39.9968	74.06	0.2676	2.25424	8.86
40.7207	156.03	0.2007	2.21583	18.67
42.7680	475.78	0.0669	2.11437	56.93
44.5629	835.68	0.2676	2.03329	100.00
50.5141	70.34	0.2676	1.80683	8.42
64.7855	82.14	0.8029	1.43907	9.83
82.1468	78.54	0.8029	1.17338	9.40

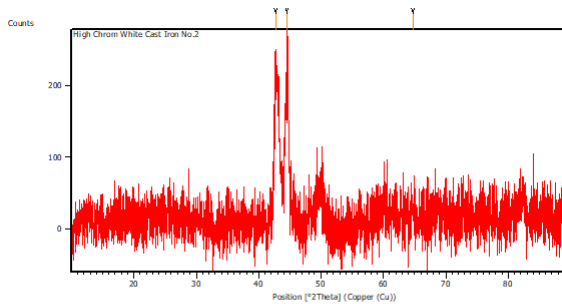
2. Liner 1H



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.8225	208.61	0.4015	2.11181	100.00
44.5572	129.87	0.2007	2.03354	62.25
49.9162	50.68	0.8029	1.82706	24.29
82.0781	21.11	0.8029	1.17418	10.12

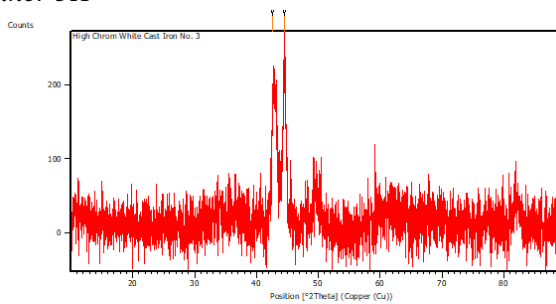
3. Liner 2H



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7049	219.09	0.2676	2.11735	85.87
44.5226	255.13	0.2007	2.03504	100.00
64.7500	21.17	0.6691	1.43977	8.30

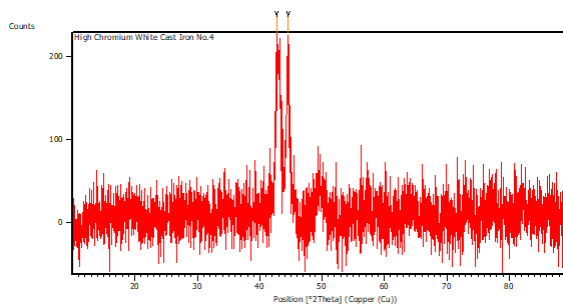
4. Liner 3H



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.6434	186.09	0.4015	2.12026	83.54
44.4998	222.75	0.4015	2.03603	100.00

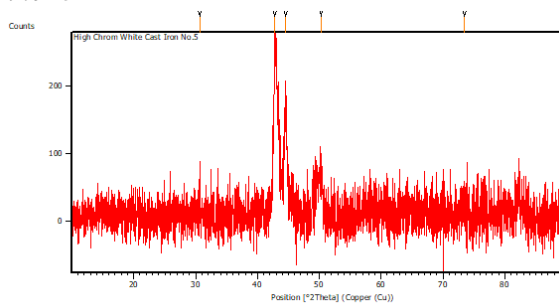
5. Liner 4H



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7122	176.32	0.4015	2.11701	87.68
44.5910	201.09	0.4684	2.03208	100.00

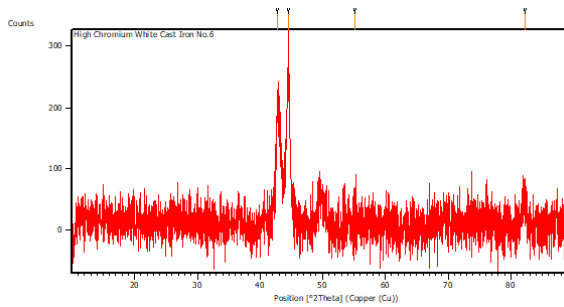
6. *Liner 5H*



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.6528	42.46	0.2007	2.91671	17.11
42.8006	248.19	0.4684	2.11284	100.00
44.5581	165.44	0.4015	2.03350	66.66
50.2916	60.02	0.4015	1.81430	24.19
73.5535	20.03	0.8029	1.28769	8.07

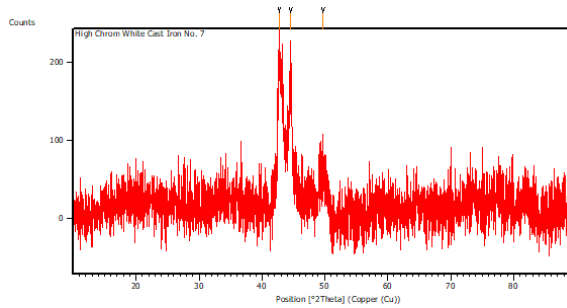
7. *Liner 6H*



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7758	195.33	0.3346	2.11401	65.88
44.5082	296.52	0.1673	2.03566	100.00
55.2233	51.50	0.1004	1.66338	17.37
82.2202	41.87	0.6691	1.17251	14.12

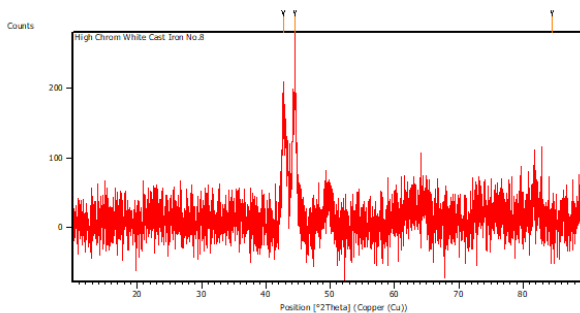
8. *Liner 7H*



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7250	215.44	0.2342	2.11641	100.00
44.5568	165.27	0.3346	2.03356	76.71
49.7991	52.05	0.9368	1.83108	24.16

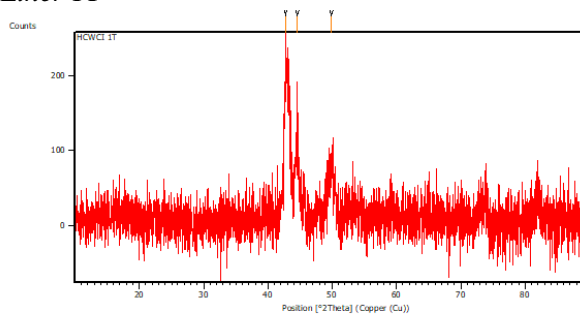
9. *Liner 8H*



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7109	158.75	0.4015	2.11707	65.93
44.4887	240.79	0.2007	2.03651	100.00
84.4556	14.61	0.1428	1.14614	6.07

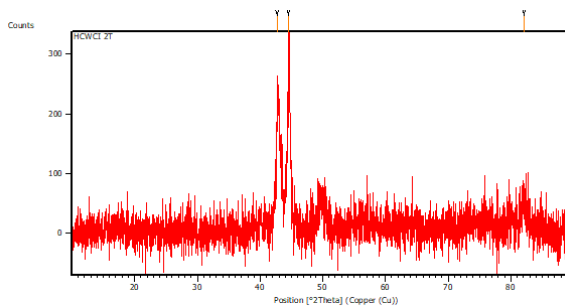
10. Liner 1T



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7705	228.19	0.3346	2.11426	100.00
44.5902	141.04	0.2676	2.03211	61.81
49.9061	75.02	0.8029	1.82740	32.87

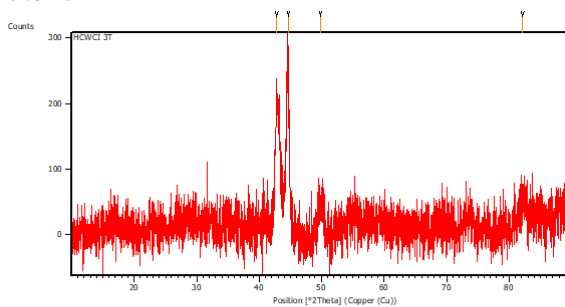
11. Liner 2T



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.6800	206.42	0.4684	2.11853	64.20
44.5391	321.51	0.2342	2.03433	100.00
82.0865	47.95	0.8029	1.17408	14.91

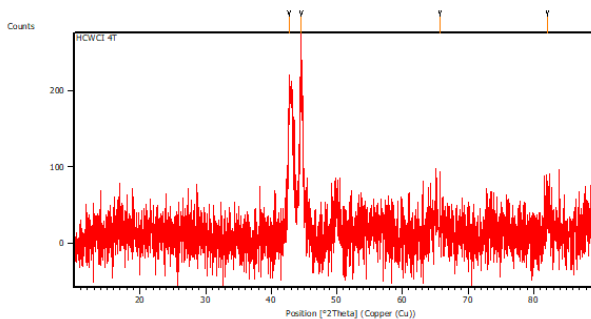
12. Liner 3T



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7830	206.36	0.4684	2.11367	77.76
44.6202	265.39	0.3011	2.03082	100.00
49.8824	60.63	0.8029	1.82822	22.84
82.1684	35.71	0.8029	1.17312	13.45

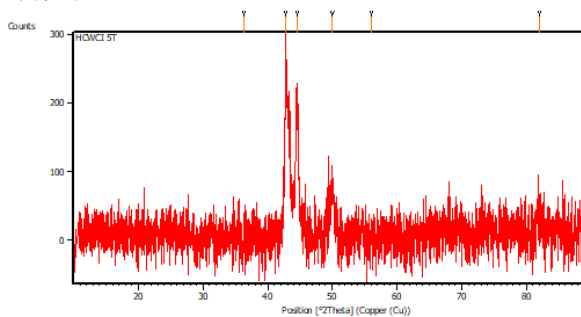
13. Liner 4T



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7126	201.23	0.2676	2.11699	89.64
44.5643	224.50	0.3346	2.03323	100.00
65.7389	31.18	0.1673	1.42049	13.89
82.0920	35.58	0.8029	1.17402	15.85

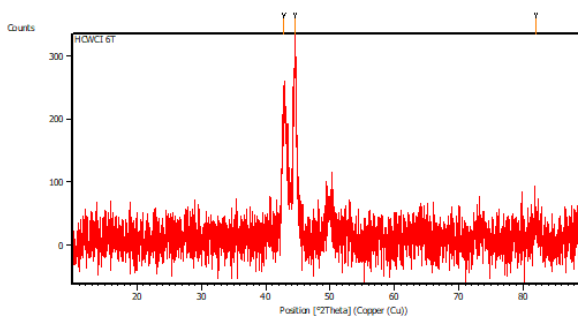
14. Liner 5T



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
36.2906	20.13	0.2007	2.47549	7.55
42.7725	266.75	0.3346	2.11417	100.00
44.5315	186.82	0.3346	2.03465	70.04
50.0317	79.65	0.4015	1.82311	29.86
56.0599	18.37	0.2676	1.64053	6.89
82.0377	23.15	0.8029	1.17466	8.68

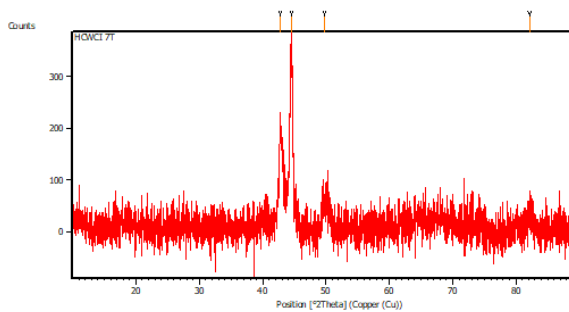
15. Liner 6T



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7846	215.47	0.4015	2.11359	69.00
44.5351	312.25	0.2007	2.03450	100.00
82.0348	41.55	0.8029	1.17469	13.31

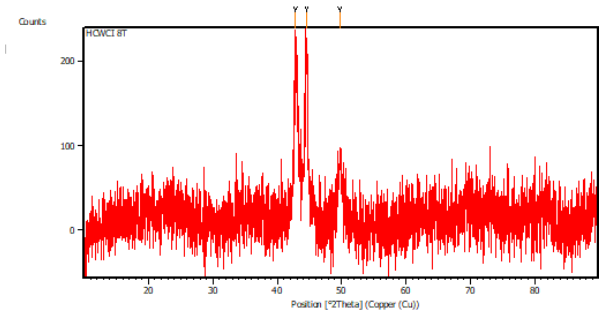
16. *Liner 7T*



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7693	215.90	0.2007	2.11432	55.99
44.5449	385.60	0.1004	2.03407	100.00
49.8227	51.14	0.6691	1.83027	13.26
82.1414	42.92	0.8029	1.17344	11.13

17. Liner 8T



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.8085	198.16	0.3346	2.11247	98.57
44.5405	201.04	0.2676	2.03426	100.00
49.7368	70.21	0.5353	1.83323	34.92

D. ICDD Card

Name and formula	
Reference code:	00-052-0513
Compound name:	Iron
Common name:	γ-Fe, austenite
Empirical formula:	Fe
Chemical formula:	Fe
Crystallographic parameters	
Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a (Å):	3.6599
b (Å):	3.6599
c (Å):	3.6599
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Calculated density (g/cm³):	7.57
Volume of cell (10⁻⁶ pm³):	49.02
Z:	4.00
RIR:	7.98

Peak list						
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I [%]
1	1	1	1	2.11300	42.760	100.0
2	2	0	0	1.83000	49.787	42.8
3	2	2	0	1.29400	73.066	17.9
4	3	1	1	1.10350	88.542	16.8
5	2	2	2	1.05650	93.623	4.6
6	4	0	0	0.91500	114.674	2.0
7	3	3	1	0.83960	133.115	6.6
8	4	2	0	0.81840	140.517	6.3

Name and formula

Reference code: 01-071-4407
Compound name: Iron
Common name: γ -Fe
Empirical formula: Fe
Chemical formula: Fe

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Fm-3m
Space group number: 225

a (Å): 3.6544
b (Å): 3.6544
c (Å): 3.6544
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 48.80
Z: 4.00

RIR: 7.97

Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	1	1	1	2.10990	42.826	100.0
2	2	0	0	1.82720	49.868	43.4
3	2	2	0	1.29200	73.198	18.3
4	3	1	1	1.10180	88.714	17.4
5	3	2	2	1.05490	93.808	4.7
6	4	0	0	0.91360	114.948	2.1
7	3	3	1	0.83840	133.495	6.8
8	4	2	0	0.81710	141.028	6.6

Name and formula

Reference code: 01-077-0255
Compound name: Iron Carbide
Empirical formula: CFe_3
Chemical formula: Fe_3C

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic
Space group: Pnma
Space group number: 62

a (Å): 5.0920
b (Å): 6.7410
c (Å): 4.5270
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 155.39
Z: 4.00

RIR: 2.06

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I [%]
1	0	1	1	3.75820	23.655	0.1
2	0	2	0	3.37050	26.422	0.5
3	1	1	1	3.02380	29.517	2.1
4	2	0	0	2.54600	35.222	4.2
5	1	2	1	2.38780	37.640	30.1
6	2	1	0	2.38180	37.739	27.8
7	0	0	2	2.26350	39.792	19.9
8	2	0	1	2.21910	40.623	17.1
9	2	1	1	2.10780	42.871	58.9
10	1	0	2	2.06840	43.729	57.5
11	2	2	0	2.03150	44.566	53.4
12	0	3	1	2.01270	45.005	100.0
13	1	1	2	1.97740	45.853	48.9
14	0	2	2	1.87910	48.401	2.9
15	1	3	1	1.87180	48.602	33.3
16	2	2	1	1.85350	49.113	40.3
17	1	2	2	1.76290	51.819	16.7
18	2	0	2	1.69160	54.177	1.2
19	2	3	0	1.68470	54.417	13.5
20	0	4	0	1.68470	54.417	13.5
21	2	1	2	1.64080	55.999	5.6
22	3	0	1	1.58950	57.983	14.3
23	2	3	1	1.57890	58.402	2.4
24	3	1	1	1.54690	59.731	4.1
25	1	3	2	1.52100	60.819	0.6
26	2	2	2	1.51190	61.260	6.5
27	1	4	1	1.50850	61.413	2.8
28	0	1	3	1.47260	63.079	0.1
29	1	0	3	1.44680	64.338	0.1
30	3	2	1	1.43750	64.805	0.2
31	1	1	3	1.41460	65.986	2.9
32	2	4	0	1.40530	66.479	4.4
33	0	4	2	1.35150	69.495	1.3
34	2	3	2	1.35150	69.495	1.3
35	2	4	1	1.34210	70.052	2.5
36	1	2	3	1.32950	70.815	13.3
37	1	4	2	1.30650	72.256	0.1
38	3	3	1	1.29750	72.837	0.2
39	2	0	3	1.29750	72.837	0.2
40	0	5	1	1.29210	73.191	1.4
41	2	1	3	1.27470	74.357	0.1
42	4	0	0	1.27300	74.473	0.1
43	3	2	2	1.25960	75.402	3.5
44	0	3	3	1.25240	75.912	1.5
45	1	5	1	1.25240	75.912	1.5
46	4	0	1	1.22550	77.888	12.3
47	1	3	3	1.21640	78.582	16.0
48	2	2	3	1.21140	78.970	0.4
49	4	1	1	1.20570	79.417	1.3
50	2	4	2	1.19390	80.361	0.9
51	2	5	0	1.19150	80.556	4.8
52	4	2	0	1.19150	80.556	4.8
53	3	3	2	1.16220	83.027	16.2
54	3	4	1	1.15620	83.554	0.5
55	4	2	1	1.15220	83.910	9.4
56	2	5	1	1.15220	83.910	9.4
57	0	0	4	1.13100	85.701	2.5
58	1	5	2	1.12940	86.007	7.2
59	3	0	3	1.12700	86.159	10.3
60	0	6	0	1.12350	86.570	5.9
61	2	3	3	1.12350	86.570	5.9
62	3	1	3	1.11230	87.661	2.0
63	4	3	0	1.10760	88.129	10.2
64	1	0	4	1.10480	88.410	4.9
65	1	4	3	1.09780	89.123	2.9
66	1	1	4	1.09020	89.913	1.8

Name and formula

Reference code: 01-077-9135
Mineral name: Cohenite, syn
Compound name: Iron Carbide
Empirical formula: CFe_3
Chemical formula: Fe_3C

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic
Space group: Pnma
Space group number: 62
 a (Å): 5.0080
 b (Å): 6.7254
 c (Å): 4.4650
 α (°): 90.0000
 β (°): 90.0000
 γ (°): 90.0000

Volume of cell (10^{-6} pm^3): 150.38
 Z : 4.00

RJR: 2.04

Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	0	1	1	3.71960	23.903	0.4
2	0	2	0	3.36270	26.485	0.5
3	1	0	1	3.33270	26.728	0.5
4	1	1	1	2.98620	29.697	1.8
5	2	0	0	2.50400	35.633	1.8
6	1	2	1	2.36710	37.982	26.0
7	2	1	0	2.34660	38.327	24.3
8	0	0	2	2.23250	40.369	21.3
9	2	0	1	2.18400	41.305	18.4
10	2	1	1	2.07720	43.534	52.5
11	1	0	2	2.03910	44.391	48.1
12	2	2	0	2.00840	45.106	54.2
13	0	3	1	2.00340	45.225	100.0
14	1	1	2	1.95140	46.500	45.6
15	1	3	1	1.86010	48.928	29.2
16	0	2	2	1.86010	48.928	29.2
17	2	2	1	1.83160	49.740	40.5
18	1	2	2	1.74360	52.436	14.1
19	0	4	0	1.68140	54.533	3.0
20	2	3	0	1.67020	54.929	11.5
21	2	1	2	1.61750	56.879	5.8
22	3	0	1	1.56360	59.029	12.9

23	2	3	1	1.56360	59.029	12.9
24	3	1	1	1.52300	60.766	2.8
25	1	3	2	1.50840	61.417	0.5
26	1	4	1	1.50110	61.749	2.2
27	2	2	2	1.49310	62.116	6.2
28	0	1	3	1.45320	64.021	0.1
29	1	0	3	1.42670	65.356	0.1
30	3	2	1	1.41780	65.818	0.2
31	1	1	3	1.39590	66.985	6.0
32	2	4	0	1.39590	66.985	6.0
33	0	4	2	1.34310	69.993	0.1
34	3	0	2	1.33740	70.335	1.2
35	2	3	2	1.33740	70.335	1.2
36	2	4	1	1.33230	70.644	2.3
37	1	2	3	1.31340	71.817	13.0
38	1	4	2	1.29720	72.857	0.1
39	0	5	1	1.28790	73.469	1.0
40	3	3	1	1.28250	73.629	0.3
41	2	0	3	1.27940	74.038	0.1
42	2	1	3	1.25690	75.593	0.1
43	1	5	1	1.24730	76.278	1.2
44	3	2	2	1.24230	76.641	2.1
45	4	0	1	1.20530	79.433	10.4
46	1	3	3	1.20360	79.583	13.0
47	2	2	3	1.19580	80.207	0.2
48	4	1	1	1.18660	80.957	2.1
49	2	5	0	1.18490	81.098	4.4
50	4	2	0	1.17330	82.071	0.9
51	3	3	2	1.14820	84.269	13.6
52	3	4	1	1.14530	84.532	7.9
53	2	5	1	1.14530	84.532	7.9
54	4	2	1	1.13480	85.500	0.5
55	1	5	2	1.12280	86.637	6.3
56	0	6	0	1.12090	86.820	5.2
57	0	0	4	1.11620	87.278	1.5
58	3	0	3	1.11090	87.800	8.3
59	2	3	3	1.11090	87.800	8.3
60	3	1	3	1.09610	89.298	1.4
61	4	3	0	1.09310	89.610	7.7
62	1	0	4	1.08950	89.986	3.9
63	1	4	3	1.08780	90.165	3.0
64	1	1	4	1.07550	91.487	2.0
65	1	6	1	1.06170	93.027	0.1

Name and formula

Reference code:	01-077-9136
Compound name:	Iron Carbide
Empirical formula:	CFe ₃
Chemical formula:	Fe ₃ C

Crystallographic parameters

Crystal system:	Hexagonal
Space group:	P6322
Space group number:	182
a (Å):	4.4965
b (Å):	4.4965
c (Å):	4.2036
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	120.0000
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	73.60
Z:	2.00
RIR:	6.57

Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	1	0	0	3.89410	22.818	0.2
2	1	0	1	2.85670	31.287	1.5
3	1	1	0	2.24820	40.074	20.3
4	0	0	2	2.10180	42.999	25.0
5	1	1	1	1.98250	45.729	100.0
6	2	0	0	1.94700	46.611	1.2
7	1	0	2	1.84960	49.224	0.7
8	2	0	1	1.76670	51.699	0.2
9	1	1	2	1.53540	60.224	14.0
10	2	1	0	1.47180	63.118	0.1
11	2	0	2	1.42840	65.269	0.2
12	2	1	1	1.38910	67.357	1.3
13	1	0	3	1.31840	71.503	0.1
14	3	0	0	1.29800	72.605	11.2
15	3	0	1	1.24020	76.794	0.1
16	2	1	2	1.20560	79.425	0.1
17	1	1	3	1.18920	80.744	10.5
18	2	0	3	1.13730	85.267	0.1
19	2	2	0	1.12410	86.512	1.0
20	3	0	2	1.10440	88.451	8.5
21	2	2	1	1.08600	90.356	6.4
22	3	1	0	1.08000	90.998	0.1
23	0	0	4	1.05090	94.275	1.4
24	3	1	1	1.04600	94.855	0.3
25	2	1	3	1.01480	98.764	0.3

Name and formula

Reference code: 01-078-5298

Compound name: Iron Carbide

Empirical formula: CFe_3

Chemical formula: Fe_3C

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic

Space group: Pnma

Space group number: 62

a (Å): 4.9930

b (Å): 6.6930

c (Å): 4.4420

Alpha (°): 90.0000

Beta (°): 90.0000

Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^{-6} pm^3): 148.44

Z: 4.00

RJR: 2.02

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	1	3.70110	24.025	0.3
2	0	2	0	3.34650	26.615	0.5
3	1	0	1	3.31870	26.843	0.4
4	1	1	1	2.97330	30.030	1.8
5	2	0	0	2.49650	35.944	1.9
6	1	2	1	2.35650	38.159	27.0
7	2	1	0	2.33910	38.454	25.0
8	0	0	2	2.22100	40.587	22.2
9	2	0	1	2.17630	41.458	19.1
10	2	1	1	2.06970	43.700	54.1
11	1	0	2	2.02930	44.616	48.1
12	2	2	0	2.00100	45.282	51.2
13	0	3	1	1.99370	45.457	100.0
14	1	1	2	1.94200	46.738	47.0
15	1	3	1	1.85150	49.170	29.2
16	0	2	2	1.85150	49.170	29.2
17	2	2	1	1.82450	49.947	41.9
18	1	2	2	1.73520	52.709	14.5
19	0	4	0	1.67320	54.823	3.2
20	2	3	0	1.66350	55.169	11.8
21	2	1	2	1.61060	57.145	5.8
22	2	3	1	1.55850	59.242	13.2
23	3	0	1	1.55850	59.242	13.2
24	3	1	1	1.51790	60.992	2.9
25	1	3	2	1.50120	61.744	0.5
26	1	4	1	1.49410	62.070	2.3
27	2	2	2	1.48660	62.418	6.3
28	0	1	3	1.44570	64.393	0.1
29	1	0	3	1.41960	65.724	0.1
30	3	2	1	1.41280	66.081	0.2
31	1	1	3	1.38990	67.313	4.6
32	2	4	0	1.38990	67.313	4.6
33	0	4	2	1.33640	70.395	0.2
34	2	3	2	1.33150	70.693	1.4
35	3	0	2	1.33150	70.693	1.4
36	2	4	1	1.32650	71.000	2.3
37	1	2	3	1.30680	72.237	13.0
38	3	1	2	1.30680	72.237	13.0
39	1	4	2	1.29100	73.263	0.1
40	0	5	1	1.28170	73.883	1.1
41	3	3	1	1.27760	74.160	0.3
42	2	0	3	1.27350	74.439	0.1
43	2	1	3	1.25110	76.005	0.1
44	4	0	0	1.24820	76.214	0.1
45	1	5	1	1.24140	76.707	1.2
46	3	2	2	1.23750	76.893	2.1
47	4	0	1	1.20170	79.734	10.0
48	1	3	3	1.19770	80.054	12.7
49	2	2	3	1.19020	80.662	0.2
50	4	1	1	1.18280	81.272	1.9
51	2	5	0	1.17970	81.531	4.4
52	4	2	0	1.16950	82.395	0.9
53	3	3	2	1.14360	84.687	13.7
54	3	4	1	1.14020	84.999	8.0
55	2	5	1	1.14020	84.999	8.0
56	4	2	1	1.13100	85.856	0.5
57	1	5	2	1.11740	87.160	6.4
58	0	6	0	1.11550	87.346	5.2
59	0	0	4	1.11030	87.840	1.6
60	3	0	3	1.10620	88.269	8.5
61	2	3	3	1.10620	88.269	8.5
62	3	1	3	1.09140	89.787	1.6
63	4	3	0	1.08930	90.007	7.8
64	1	0	4	1.08400	90.569	4.0
65	1	4	3	1.08250	90.729	3.0
66	1	1	4	1.07010	92.082	2.0
67	1	6	1	1.05800	93.450	0.1

Name and formula

Reference code: 01-079-4902

Compound name: Iron Carbide

Empirical formula: CFe_3

Chemical formula: Fe_3C

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic

Space group: Pnma

Space group number: 62

a (Å): 5.0787

b (Å): 6.7297

c (Å): 4.5144

Alpha (°): 90.0000

Beta (°): 90.0000

Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 154.29

Z: 4.00

RIR: 1.85

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I [%]
1	0	1	1	3.74900	23.714	1.4
2	0	2	0	3.36480	26.468	2.0
3	1	0	1	3.36480	26.468	2.0
4	1	1	1	3.01620	29.599	1.4
5	2	0	0	2.53940	35.317	3.7
6	1	2	1	2.38260	37.725	33.1
7	2	1	0	2.37580	37.838	30.5
8	0	0	2	2.25720	39.908	21.8
9	2	0	1	2.21320	40.736	15.4
10	2	1	1	2.10240	42.986	55.4
11	1	0	2	2.06270	43.856	61.8
12	2	2	0	2.02690	44.672	59.1
13	0	3	1	2.00890	45.094	100.0
14	1	1	2	1.97210	45.984	51.0
15	1	3	1	1.86810	48.704	33.7
16	2	2	1	1.84910	49.238	53.4
17	1	2	2	1.75860	51.955	20.0
18	2	3	0	1.68120	54.540	12.7
19	0	4	0	1.68120	54.540	12.7
20	2	1	2	1.63640	56.163	5.9
21	3	0	1	1.58510	58.151	14.2
22	2	3	1	1.57550	58.540	1.4
23	3	1	1	1.54290	59.901	4.4
24	1	3	2	1.51840	60.970	0.7
25	2	2	2	1.50810	61.431	7.2

26	1	4	1	1.50560	61.544	2.5
27	0	1	3	1.46850	63.276	0.1
28	1	0	3	1.44280	64.538	0.1
29	3	2	1	1.43400	64.982	0.6
30	1	1	3	1.41070	66.192	1.7
31	2	4	0	1.40250	66.629	3.0
32	3	0	2	1.35430	69.331	0.1
33	2	3	2	1.34830	69.684	0.9
34	0	4	2	1.34830	69.684	0.9
35	2	4	1	1.33940	70.214	1.8
36	1	2	3	1.32600	71.031	14.8
37	1	4	2	1.30370	72.436	0.1
38	2	0	3	1.29450	73.033	0.3
39	3	3	1	1.29450	73.033	0.3
40	0	5	1	1.28980	73.343	1.6
41	2	1	3	1.27130	74.589	0.1
42	3	2	2	1.25640	75.628	3.8
43	0	3	3	1.25020	76.070	1.8
44	1	5	1	1.25020	76.070	1.8
45	4	0	1	1.22220	78.138	12.2
46	1	3	3	1.21350	78.887	14.6
47	2	2	3	1.20820	79.220	0.4
48	4	1	1	1.20260	79.663	1.2
49	2	4	2	1.19130	80.572	0.9
50	2	5	0	1.18920	80.744	5.7
51	3	3	2	1.15940	83.272	14.2
52	3	4	1	1.15370	83.776	0.8
53	2	5	1	1.15000	84.107	9.3
54	0	0	4	1.12860	86.083	3.0
55	1	5	2	1.12720	86.216	7.8
56	3	0	3	1.12470	86.455	9.3
57	0	6	0	1.12160	86.753	4.8
58	2	3	3	1.12160	86.753	4.8
59	3	1	3	1.10930	87.959	2.2
60	4	3	0	1.10500	88.390	9.2
61	1	0	4	1.10170	88.724	4.2
62	1	4	3	1.09520	89.391	2.4
63	1	1	4	1.08720	90.229	2.1
64	4	3	1	1.07330	91.729	0.1
65	0	2	4	1.07000	92.094	0.1
66	3	2	3	1.06670	92.462	1.1
67	3	4	2	1.05500	93.797	0.7
68	4	2	2	1.05210	94.135	2.0

Name and formula

Reference code:	00-006-0603
Compound name:	Carbon Chromium
Empirical formula:	C ₇ Cr ₇
Chemical formula:	Cr ₇ C ₃

Crystallographic parameters

Crystal system:	Orthorhombic
a (Å):	7.0149
b (Å):	12.1530
c (Å):	4.5320
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000

Volume of cell (10⁻⁶ pm³): 386.36

RJR: -

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1	2	3	1	2.28000	39.492	50.0
2	1	1	2	2.11000	42.824	50.0
3	1	2	2	2.03000	44.600	100.0
4	2	5	0	2.01000	45.068	20.0
5	2	1	2	1.89000	48.104	10.0
6	3	3	1	1.84000	49.490	20.0
7				1.80000	50.674	40.0
8	0	7	0	1.74000	52.553	30.0
9	3	4	2	1.43000	65.186	20.0
10	5	0	1	1.34000	70.178	20.0
11				1.32000	71.403	10.0
12				1.25000	76.084	10.0
13	1	10	0	1.19900	79.950	40.0
14				1.17500	81.926	40.0
15	6	1	0	1.16300	82.957	30.0
16				1.15900	83.307	30.0

Name and formula

Reference code: 00-006-0687

Compound name: Carbon Chromium

Empirical formula: C_3Cr_7

Chemical formula: Cr_7C_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Unknown

RJR:

-

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1				2.27000	39.673	50.0
2				2.10000	43.038	60.0
3				2.02000	44.833	100.0
4				1.99000	45.547	20.0
5				1.90000	47.835	10.0
6				1.82000	50.079	30.0
7				1.79000	50.978	50.0
8				1.73000	52.880	30.0
9				1.59000	57.955	10.0
10				1.42000	65.703	30.0
11				1.34000	70.178	30.0
12				1.31500	71.716	20.0
13				1.24500	76.445	10.0
14				1.19500	80.272	50.0
15				1.17200	82.181	50.0
16				1.15900	83.307	30.0
17				1.15400	83.749	30.0

Name and formula

Reference code: 00-011-0550
Compound name: Chromium Carbide
Empirical formula: Cr_3Cr_7
Chemical formula: Cr_7C_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: $P31c$
Space group number: 159

a (Å): 13.9800
b (Å): 13.9800
c (Å): 4.5230
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 120.0000

Calculated density (g/cm^3): 6.94
Measured density (g/cm^3): 6.90
Volume of cell (10^6 pm^3): 765.55
Z: 8.00

RJR: -

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [a]
1	3	1	1	2.68000	33.408	20.0
2	3	2	1	2.35000	38.269	20.0
3	4	1	1	2.28000	39.492	70.0
4	1	0	2	2.22000	40.606	50.0
5	5	0	1	2.14000	42.195	50.0
6	2	0	2	2.12000	42.612	70.0
7	4	2	1	2.04000	44.370	100.0
8	6	0	0	2.02000	44.833	50.0
9	5	1	1	1.96000	46.284	70.0
10	2	2	2	1.90000	47.835	50.0
11	6	0	1	1.84000	49.498	60.0
12	4	0	2	1.81000	50.375	70.0
13	5	2	1	1.78000	51.285	50.0
14	4	4	0	1.75000	52.230	70.0
15	6	1	1	1.71000	53.547	60.0
16	3	3	2	1.62000	56.783	60.0
17	7	1	1	1.51000	61.345	50.0
18	8	0	1	1.43500	64.931	70.0
19	4	0	3	1.35000	69.583	80.0
20	6	4	1	1.33000	70.785	50.0
21	8	2	0	1.32000	71.403	30.0
22	9	0	1	1.29000	73.330	30.0
23	5	0	3	1.28000	73.997	60.0
24	9	1	0	1.27000	74.679	30.0
25	4	2	3	1.26000	75.374	70.0
26	5	1	3	1.24000	76.809	20.0
27				1.22700	77.775	60.0
28				1.21500	78.690	60.0
29	10	0	1	1.13000	85.325	100.0
30				1.13400	85.077	30.0
31	2	2	5	1.19800	80.945	100.0
32	8	5	0	1.13400	80.323	20.0
33	3	4	1	1.11000	83.038	80.0

Name and formula

Reference code: 00-036-1482
Compound name: Chromium Carbide
Common name: heptachromium tricarbonide
Empirical formula: Cr_7C_3
Chemical formula: Cr_7C_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic
Space group: Pnmc
Space group number: 51

a (Å): 7.0149
b (Å): 12.1530
c (Å): 4.5320
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10⁻⁶ pm³): 386.36
Z: 4.00

RIR: -

Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I [%]
1	0	4	0	3.03900	29.366	2.0
2	1	5	0	2.29690	39.189	33.0
3	0	0	2	2.26580	39.750	3.0
4	0	5	1	2.14120	42.170	6.0
5	1	1	2	2.12310	42.547	46.0
6	1	5	1	2.04890	44.167	100.0
7	0	6	0	2.02560	44.702	13.0
8	3	2	1	1.96620	46.129	1.0
9	2	0	2	1.90280	47.760	5.0
10	3	3	1	1.84900	49.241	11.0
11	2	2	2	1.81620	50.191	24.0
12	1	6	1	1.78840	51.027	3.0
13	2	6	0	1.75460	52.082	16.0
14	3	4	1	1.71500	53.379	1.0
15	3	1	2	1.61220	57.083	2.0
16	0	8	0	1.51960	60.916	2.0
17	3	3	2	1.50990	61.350	2.0
18	0	8	1	1.44040	64.658	5.0
19	0	3	3	1.41570	65.928	1.0
20	1	3	3	1.38730	67.456	1.0
21	2	2	3	1.35260	69.430	7.0
22	2	8	1	1.33260	70.626	2.0
23	1	4	3	1.32810	70.901	1.0
24	1	5	3	1.26220	75.220	3.0
25	5	5	0	1.21510	78.683	3.0
26	3	3	3	1.21070	79.025	12.0
27	5	0	2	1.19290	80.442	1.0
28	2	8	2	1.18740	80.892	13.0
29	5	5	1	1.17370	82.037	10.0
30	5	2	2	1.17060	82.301	12.0
31	3	9	0	1.16940	82.404	12.0
32	1	9	2	1.14450	84.605	1.0
33	4	1	3	1.13910	85.100	1.0
34	0	0	4	1.13300	85.668	1.0
35	3	9	1	1.13230	85.734	1.0
36	3	5	3	1.12480	86.445	2.0

Name and formula

Reference code: 01-071-3799
Compound name: Chromium Carbide
Empirical formula: Cr_3C_7
Chemical formula: Cr_7C_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: $P6_3mc$
Space group number: 186

a (Å): 14.0100
b (Å): 14.0100
c (Å): 4.5320
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 120.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 770.37
Z: 8.00

RIR: 1.81

Peak list

No.	h	k	l	d (Å)	2Theta(deg)	I (%)
1	1	0	0	12.13300	7.280	0.1
2	1	1	0	7.00500	12.627	0.1
3	2	0	0	6.06650	14.590	0.8
4	1	0	1	4.24550	20.907	45.3
5	2	0	1	3.63070	24.498	17.4
6	2	2	0	3.50250	25.410	0.5
7	2	1	1	3.22350	27.651	73.8
8	4	0	0	3.03320	29.423	8.2
9	3	0	1	3.01750	29.580	21.5
10	3	1	1	2.70180	33.130	39.2
11	4	0	1	2.52080	35.586	29.2
12	3	2	1	2.37190	37.902	13.1
13	4	2	0	2.29290	39.261	60.0
14	4	1	1	2.28610	39.382	33.8
15	0	0	2	2.26600	39.746	1.0
16	5	0	1	2.13920	42.211	21.3
17	2	0	2	2.12280	42.553	100.0
18	4	2	1	2.04600	44.233	12.8
19	6	0	0	2.02220	44.782	19.8
20	5	1	1	1.96390	46.187	42.6
21	2	2	2	1.90260	47.766	6.1
22	6	0	1	1.84670	49.306	7.4
23	4	3	1	1.82560	49.915	5.1
24	4	0	2	1.81540	50.215	48.5
25	5	2	1	1.78570	51.109	16.6
26	4	4	0	1.75120	52.191	23.3
27	6	1	1	1.71300	53.446	11.3
28	6	2	0	1.68260	54.491	0.1
29	7	0	1	1.61890	56.825	16.2

30	4	2	2	1.61170	57.102	1.6
31	6	2	1	1.57740	58.462	3.7
32	7	1	1	1.51460	61.139	4.4
33	6	0	2	1.50880	61.399	4.4
34	1	0	3	1.49910	61.840	1.3
35	4	3	2	1.49910	61.840	1.3
36	5	4	1	1.46950	63.228	9.4
37	2	0	3	1.46590	63.401	1.1
38	6	3	1	1.44840	64.258	4.6
39	8	0	1	1.43820	64.769	0.6
40	6	1	2	1.43480	64.942	3.7
41	2	1	3	1.43480	64.942	3.7
42	3	0	3	1.41520	65.954	1.3
43	7	2	1	1.40880	66.292	7.0
44	6	4	0	1.39180	67.209	0.2
45	4	4	2	1.38570	67.544	2.8
46	3	1	3	1.37820	67.962	2.8
47	7	0	2	1.37820	67.962	2.8
48	8	1	1	1.35510	69.284	1.0
49	6	2	2	1.35220	69.454	2.5
50	4	0	3	1.35220	69.454	2.5
51	6	4	1	1.33040	70.760	0.8
52	3	2	3	1.32770	70.926	1.2
53	8	2	0	1.32380	71.167	1.4
54	7	1	2	1.31210	71.899	3.0
55	4	1	3	1.31210	71.899	3.0
56	7	3	1	1.30710	72.218	2.4
57	9	0	1	1.29220	73.184	0.9
58	5	0	3	1.28250	73.829	2.2
59	5	4	2	1.28250	73.829	2.2
60	8	2	1	1.27070	74.631	0.2
61	6	5	0	1.27070	74.631	0.2
62	4	2	3	1.26150	75.269	1.9
63	8	0	2	1.26040	75.346	2.0
64	7	2	2	1.24150	76.699	5.5
65	5	1	3	1.24150	76.699	5.5
66	6	5	1	1.22460	77.956	5.6
67	7	4	1	1.21330	78.822	3.9
68	10	0	0	1.21330	78.822	3.9
69	6	0	3	1.21020	79.064	1.3
70	4	3	3	1.20430	79.528	0.7
71	8	1	2	1.20430	79.528	0.7
72	5	5	2	1.19260	80.466	2.9
73	5	2	3	1.19260	80.466	2.9
74	8	3	1	1.18880	80.777	4.4
75	6	4	2	1.18590	81.015	23.8
76	10	0	1	1.17200	82.181	1.4
77	7	3	2	1.17020	82.335	2.6
78	6	1	3	1.17020	82.335	2.6
79	6	6	0	1.16750	82.567	15.7
80	9	2	1	1.15600	83.572	0.9
81	8	4	0	1.14650	84.423	0.2
82	8	2	2	1.14300	84.742	1.4
83	7	0	3	1.13880	85.128	3.2
84	0	0	4	1.13300	85.668	6.4
85	7	5	1	1.12570	86.359	0.7
86	6	2	3	1.12410	86.512	0.8

Name and formula

Reference code: 01-059-7244
Compound name: Chromium Carbide
Empirical formula: C_3Cr_7
Chemical formula: Cr_7C_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic
Space group: Pnma
Space group number: 62

a (Å): 4.5260
b (Å): 7.0100
c (Å): 12.1420
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^{-6} nm^3): 385.23
Z: 4.00

RJR: 1.02

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I [%]
1	0	0	2	6.07090	14.579	0.8
2	0	1	1	6.07090	14.579	0.8
3	1	0	1	4.24100	20.930	0.1
4	1	1	1	3.62860	24.513	0.1
5	1	0	2	3.62860	24.513	0.1
6	0	2	0	3.50510	25.391	0.1
7	0	1	3	3.50510	25.391	0.1
8	1	1	2	3.22250	27.660	1.2
9	0	0	4	3.03540	29.402	1.7
10	0	2	2	3.03540	29.402	1.7
11	1	0	3	3.01700	29.585	2.4
12	1	2	1	2.70170	33.132	4.7
13	1	0	4	2.52100	35.583	0.1
14	1	2	2	2.52100	35.583	0.1
15	1	1	4	2.37230	37.896	2.6
16	0	3	1	2.29460	39.230	34.5
17	0	2	4	2.29460	39.230	34.5
18	1	2	3	2.28660	39.373	16.3
19	2	0	0	2.26300	39.801	2.2
20	2	0	1	2.22470	40.516	6.7
21	2	1	0	2.15360	41.916	2.3
22	1	0	5	2.13980	42.199	10.7
23	2	0	2	2.12050	42.601	45.9
24	2	1	1	2.12050	42.601	45.9
25	1	2	4	2.04660	44.219	100.0
26	1	3	1	2.04660	44.219	100.0
27	2	1	2	2.02960	44.610	2.5

28	D	3	3	2.02360	44.749	12.0
29	D	0	6	2.02360	44.749	12.0
30	1	3	2	1.96460	46.169	16.8
31	2	2	0	1.90120	47.003	4.7
32	2	1	3	1.90120	47.003	4.7
33	2	2	1	1.87830	48.423	0.2
34	1	0	6	1.84740	49.266	10.4
35	1	3	3	1.84740	49.266	10.4
36	1	2	5	1.82640	49.891	1.2
37	2	0	4	1.81430	50.247	24.1
38	2	2	2	1.81430	50.247	24.1
39	1	1	6	1.78640	51.088	5.4
40	D	4	0	1.75250	52.150	15.5
41	D	2	6	1.75250	52.150	15.5
42	2	2	3	1.72080	53.185	1.7
43	1	3	4	1.71370	53.423	7.4
44	D	3	5	1.68380	54.449	0.5
45	D	4	2	1.68380	54.449	0.5
46	2	0	5	1.65560	55.455	0.6
47	2	3	0	1.62560	56.570	0.6
48	1	0	7	1.61970	56.794	3.2
49	1	4	1	1.61970	56.794	3.2
50	2	2	4	1.61120	57.122	1.7
51	2	3	1	1.61120	57.122	1.7
52	2	3	2	1.57030	58.753	0.0
53	D	4	4	1.51770	61.001	1.6
54	D	0	8	1.51770	61.001	1.6
55	1	4	3	1.51540	61.103	1.3
56	2	3	3	1.50850	61.413	1.0
57	2	0	6	1.50850	61.413	1.0
58	2	2	5	1.49700	61.936	0.1
59	3	0	1	1.49700	61.936	0.1
60	2	1	6	1.47470	62.979	0.3
61	1	2	7	1.47030	63.189	0.1
62	3	0	2	1.46410	63.488	0.6
63	3	1	1	1.46410	63.488	0.6
64	1	3	6	1.44920	64.218	0.1
65	1	4	4	1.43900	64.729	4.2
66	1	0	8	1.43900	64.729	4.2
67	3	1	2	1.43300	65.033	0.3
68	2	3	4	1.43300	65.033	0.3
69	3	0	3	1.41360	66.039	0.1
70	1	1	8	1.40960	66.250	0.1

71	0	2	8	1.39280	67.154	0.3
72	0	5	1	1.39280	67.154	0.3
73	1	4	0	1.38560	67.550	0.7
74	2	2	6	1.38560	67.550	0.7
75	2	4	1	1.37680	68.040	0.4
76	3	2	1	1.37680	68.040	0.4
77	1	4	5	1.35580	69.243	0.2
78	2	4	2	1.35100	69.524	7.1
79	3	2	2	1.35100	69.524	7.1
80	1	5	1	1.33120	70.711	2.1
81	1	3	7	1.33120	70.711	2.1
82	0	1	9	1.32480	71.105	0.8
83	0	5	3	1.32480	71.105	0.8
84	3	2	3	1.31100	71.969	0.4
85	2	4	3	1.31100	71.969	0.4
86	1	5	2	1.30780	72.173	0.2
87	1	0	9	1.29290	73.138	0.3
88	2	2	7	1.28140	73.903	1.3
89	3	0	5	1.28140	73.903	1.3
90	1	4	6	1.27140	74.583	0.5
91	1	5	3	1.27140	74.583	0.5
92	2	3	6	1.26730	74.865	0.2
93	3	2	4	1.26060	75.332	2.2
94	2	4	4	1.26060	75.332	2.2
95	2	1	8	1.24070	76.788	0.4
96	3	3	2	1.24070	76.788	0.4
97	1	3	8	1.22530	77.903	1.2
98	1	5	4	1.22530	77.903	1.2
99	0	5	5	1.21420	78.752	2.4
100	1	2	9	1.21420	78.752	2.4
101	3	0	6	1.20950	79.118	11.2
102	3	3	3	1.20950	79.118	11.2
103	3	2	5	1.20350	79.591	0.2
104	2	4	5	1.20350	79.591	0.2
105	2	5	0	1.19180	80.531	0.8
106	3	1	6	1.19180	80.531	0.8
107	1	4	7	1.18950	80.719	0.7
108	2	5	1	1.18610	80.999	11.5
109	2	2	8	1.18610	80.999	11.5
110	1	0	10	1.17270	82.122	8.0
111	1	5	5	1.17270	82.122	8.0
112	0	3	9	1.16840	82.490	9.0
113	0	6	0	1.16840	82.490	9.0
114	2	0	9	1.15880	83.325	0.2
115	1	1	10	1.15670	83.510	0.7
116	0	6	2	1.14730	84.351	0.1
117	0	4	8	1.14730	84.351	0.1
118	2	5	3	1.14330	84.715	1.0
119	2	4	6	1.14330	84.715	1.0
120	3	0	7	1.13830	85.174	0.2
121	3	4	1	1.13830	85.174	0.2
122	4	0	0	1.13150	85.809	1.5
123	1	3	9	1.13150	85.809	1.5
124	4	0	1	1.12660	86.273	0.7
125	1	6	1	1.12660	86.273	0.7
126	3	4	2	1.12360	86.560	1.2
127	3	3	5	1.12360	86.560	1.2
128	4	1	0	1.11680	87.219	1.7
129	1	5	6	1.11680	87.219	1.7
130	4	1	1	1.11230	87.661	0.7
131	1	6	2	1.11230	87.661	0.7
132	2	5	4	1.10940	87.949	1.2
133	2	3	8	1.10940	87.949	1.2
134	3	4	3	1.10020	88.877	0.5
135	2	2	9	1.10020	88.877	0.5
136	4	1	2	1.09860	89.041	0.1
137	1	6	3	1.08950	89.986	0.2
138	4	0	3	1.08950	89.986	0.2
139	2	4	7	1.08260	90.719	0.1
...

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu, Kakak, dan Adik-adik tercinta serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi.
2. Budi Agung Kurniawan, S.T, M. Sc. dan Wikan Jatimurti, S.T, M. Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
4. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. Dian Mughni Felicia, ST., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
6. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
7. Keluarga MT 15 khususnya Para Monster dan Pendekar 757, Aji, Mail, Majdi, Epi, Ihsan, Ifad, Teko, Zulfa, Ateng, Doddy, Mitro, Farid, Asis, Bathara, Bontang, Bogel, Domo, Ijal, dan Kholid yang telah memberikan semangat dan energi positif selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.
8. Geng Bromo, Ihsan, Domo, Reza, Daniel, Qory, Anggun, Bani, Tutut, dan Nana yang selalu menjadi sahabat kecil terbaik bagi penulis.
9. Tamara yang selalu menemani dan memberikan saran dalam keseharian dan pengerjaan Tugas Akhir ini.
10. Qory khususnya sebagai sahabat dan partner Tugas Akhir yang menemani dan tempat berkeluh kesah selama perkuliahan

11. Anindya, Karim, dan Ayyub sahabat terbaik untuk jalan-jalan dan cerita banyak hal.
12. Qory, Reja, Inggil, Ajeng, Ifad, dan Ryan teman-teman satu tim tugas akhir di PT. Semen Indonesia yang telah memberikan bantuan, semangat, dan cerita selama pengerjaan tugas akhir ini..
13. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Jakarta tanggal 08 September 1995. merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Penulis mengenyam pendidikan di TK Aisyiah 21, SD Muhammadiyah 24 Jakarta, SMP Negeri 216 Jakarta dan SMA Taruna Nusantara. Setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2013 terdaftar dengan NRP 2713100083. Di Teknik Material dan Metalurgi penulis memilih bidang Metalurgi dan Perlakuan Panas. Selama perkuliahan penulis aktif dalam kegiatan akademis dan non akademis. Dalam kegiatan akademis penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Mata Kuliah Perlakuan Panas. Disamping kegiatan akademis, penulis aktif dalam kegiatan akademis, menjadi anggota Senat Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi, anggota Steering Committee Kaderisasi dan Staff Ahli Dewan Perwakilan Mahasiswa ITS, selain itu penulis juga mendalami profesi sebagai fotografer lepas. Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT. Newmont Nusa Tenggara pada bulan Juni-Juli 2016. Selama kerja praktek penulis mendalami topik terkait sikuit flotasi tembaga dalam produksi konsentrat tembaga.

Email: muhammad.farisi1995@gmail.com.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)